

### 8.3.4 投影物镜偏振效应与矢量光刻成像模型

为了避免光在物镜内发生背向反射，避免光向照明系统反向传播，投影物镜的光学元件普遍镀有抗反射膜层。在一定入射角范围内对这些抗反射膜进行优化。高NA系统中，不同衍射级次入射到光学系统界面的入射角范围很大，导致了各种与偏振有关的振幅和相位效应，它们随光学系统内部衍射光方向的变化而变化。可利用琼斯光瞳  $\hat{\mathbf{J}}(f_x, f_y)$  描述投影物镜与偏振有关的相位与振幅特性。琼斯光瞳由八个标量光瞳函数组成，其中四个光瞳函数用于描述两个正交偏振态的相位和切趾，另外四个光瞳函数用于描述正交偏振态幅值和相位之间的耦合作用。这些传递函数可以简化为波前、切趾、衰减和延迟等基本物理效应的光瞳图<sup>[29, 30]</sup>。从标量成像中我们已经了解了像差和切趾（光瞳面的透过率变化）的成像效应。部分内容已经在8.1节进行了讨论。衰减和延迟引入了其他物理效应。这些效应与入射光偏振态相对于琼斯光瞳主轴的方向有关（更详细的讨论参见 Ruoff 和 Totzeck<sup>[30]</sup> 的文章）。

光通过投影物镜后的变化可以用广义的式（2.9）描述：

$$\mathbf{E}^{\text{exit}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) = \hat{\mathbf{T}}^{\text{out}}(f_x, f_y) \hat{\mathbf{J}}(f_x, f_y) \hat{\mathbf{T}}^{\text{in}}(f_x, f_y) \times \mathbf{E}^{\text{ff}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) \quad (8.15)$$

式中， $\mathbf{E}^{\text{ff}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}})$  是在照明点  $f_x^{\text{inc}}$ 、 $f_y^{\text{inc}}$  照明下的掩模远场电场，即投影物镜入瞳  $f_x$ 、 $f_y$  位置的电场。可以利用严格衍射场仿真或标量基尔霍夫方法计算这种电场。 $\mathbf{E}^{\text{exit}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}})$  为投影物镜出瞳处的电场。Mansuripur<sup>[31]</sup> 矩阵  $\hat{\mathbf{T}}^{\text{in/out}}$  用于描述光进入或者射出投影物镜光瞳面时偏振方向的变化。

与标量方法类似，通过逆傅里叶变换得到像面  $x$ 、 $y$  处的电场：

$$\mathbf{E}^{\text{img}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) = \mathcal{F}^{-1}[\mathbf{E}^{\text{exit}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}})] \quad (8.16)$$

最后，将所有正交场分量  $E_i$  叠加得到空间像强度（式中，source 指光源）：

$$I(x, y) = \iint_{\text{source}} S(f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) \sum_{i=x, y, z} [E_i^{\text{img}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) E_i^{\text{img}}(f_x, f_y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}})^*] df_x^{\text{inc}} df_y^{\text{inc}} \quad (8.17)$$

图 8.27 显示了矢量效应对高 NA 光刻成像的重要性。图中对比了数值孔径 NA=0.93 条件下接触孔阵列的空间像。左侧空间像是标量模型的仿真结果；右侧空间像是矢量模型的仿真结果，是正确的空间像。与标量模型相比，矢量模型仿真出了空间像对比度损失现象。

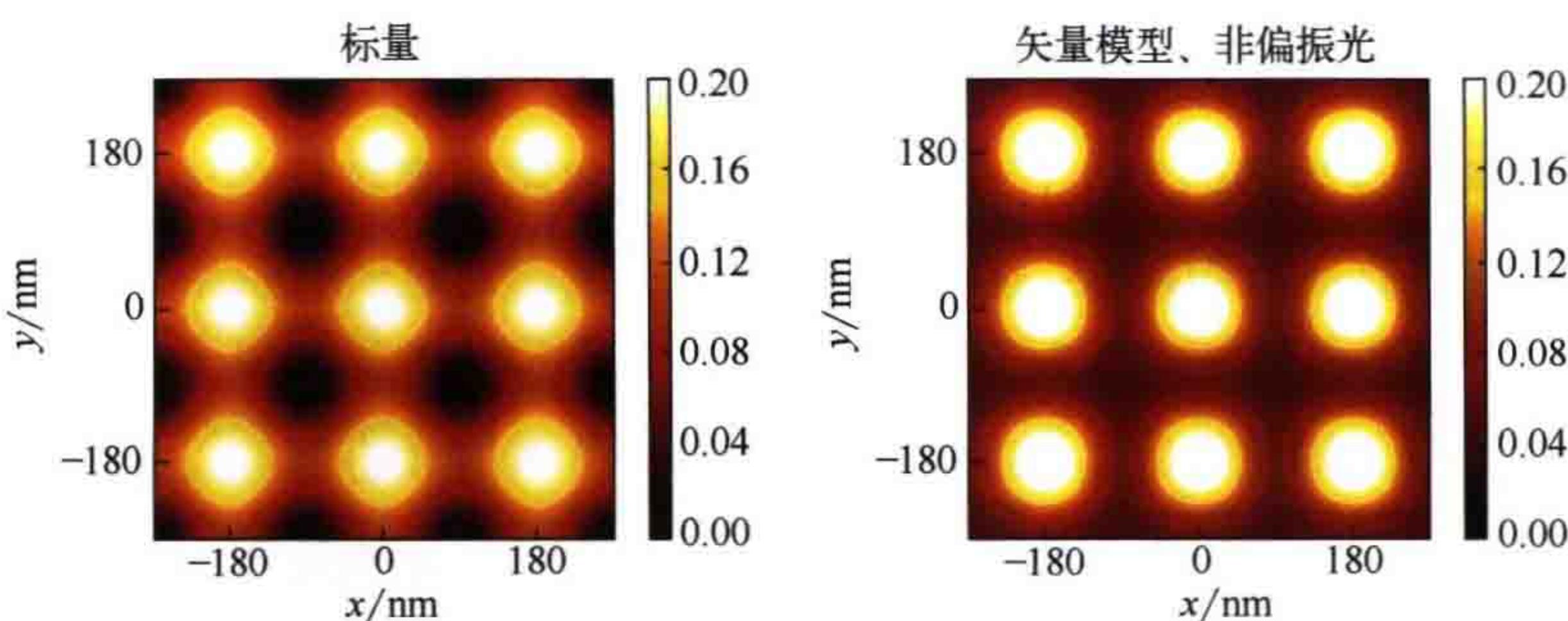


图 8.27  $x$  和  $y$  方向宽度 90nm、周期 180nm 的接触孔阵列的仿真空间像。

左图为标量成像模型仿真结果，右图为矢量成像模型的仿真结果。

成像条件：波长 193nm，数值孔径 0.93，四极照明  $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.7/0.9$ ，极张角为 20°

通常将矢量成像模型与传输矩阵法相结合，模拟光在平面膜层系统中的传播，计算光刻胶内的空间像强度。图 8.28 为交替型 PSM 在光刻胶内成像的强度分布截面图。仿真中采用了一种折射率匹配的基底材料。本仿真中的偏振效应比图 8.23 所示空间像中的偏振效应弱。这是光线在空气 / 光刻胶界面折射的结果。较小的传播角减少了光刻胶内 TM 偏振光的成像对比度损失。

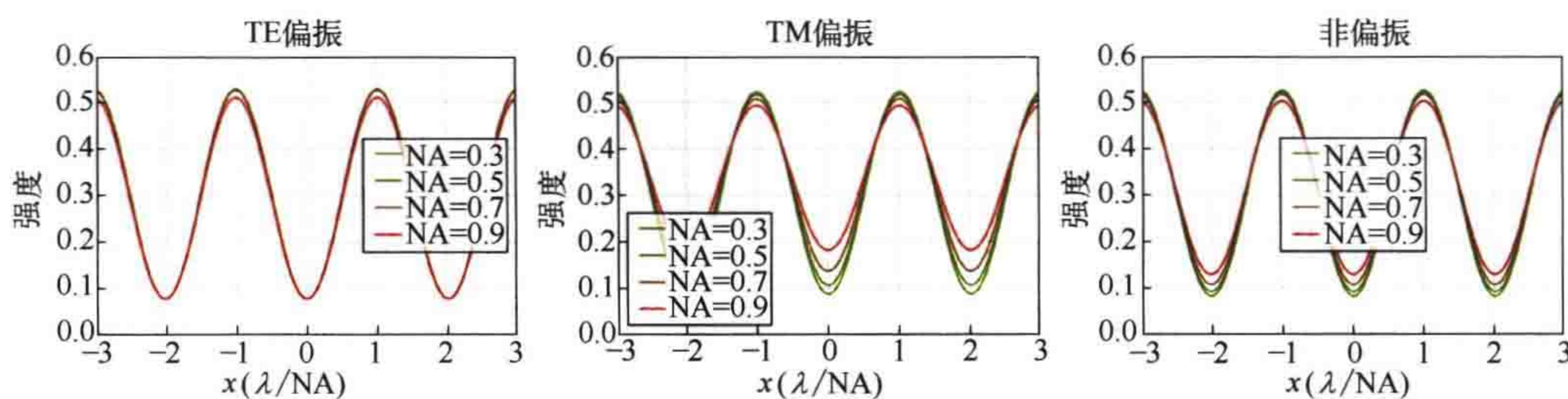


图 8.28 不同数值孔径、特征尺寸下密集线空图形交替型相移掩模的胶内像。

光刻胶位于折射率匹配的基底上。掩模和光学参数与图 8.23 所示仿真中的参数相同

### 8.3.5 偏振照明

如图 8.28 所示，数值孔径  $NA \leq 0.7$  时，TE 光和非偏振光照明条件下的空间像对比度几乎相同。该现象以及光刻仿真结果表明， $NA \leq 0.7$  时，非偏振光可以用于光刻成像。大多数数值孔径低于 0.75 的步进扫描投影光刻机采用非偏振照明。对于更大数值孔径，非偏振光不能提供最佳的空间像对比度和光刻性能。因此，高 NA 光刻成像中采用偏振照明。

从前文的结果可以看出，TE 偏振光明显改善了单方向线空图形的成像对比度。通常，掩模上包含不同方向的线空图形，以及边缘平行于  $x$  和  $y$  轴的 2D 图形。这些图形对应的最佳偏振态是什么？如何产生最佳偏振态？由于很难改变投影物镜光

瞳内衍射级次的偏振状态，所以常通过调整照明系统内光的偏振态改善成像质量。图 8.29 显示了不同偏振照明模式下接触孔阵列的空间像仿真结果。

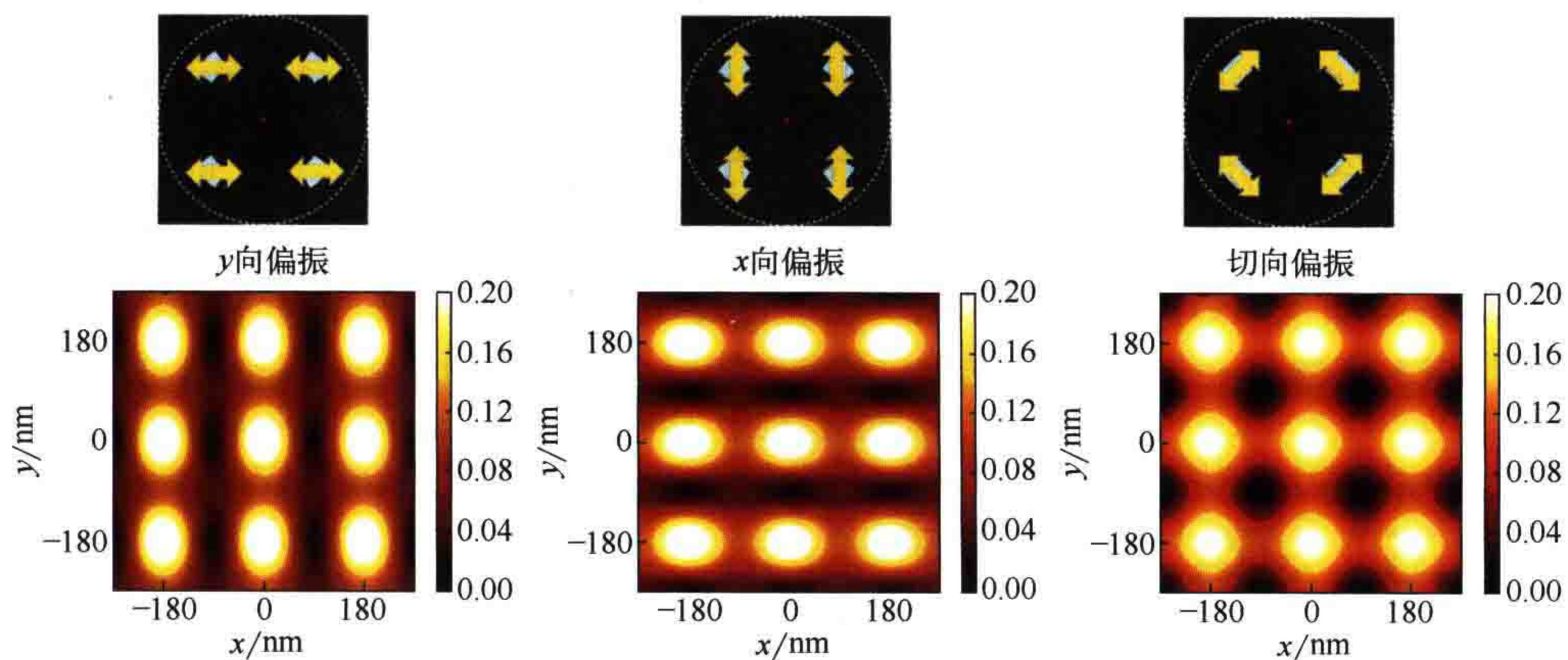


图 8.29 不同偏振照明模式下接触孔阵列的空间像仿真结果。四极照明各个极中的箭头表示偏振方向（第一行）。第二行为相应的空间像。掩模和光学参数与图 8.23 所示仿真中的参数相同

所有照明点都采用相同的线偏振会产生非常不对称的空间像。如图 8.29 左图所示， $y$  方向偏振光照明条件下，空间像在  $x$  方向的调制度很高，但  $y$  方向的调制度较差。第二列所示  $x$  偏振光照明条件下的表现正好相反。切向偏振照明时  $x$  和  $y$  两个方向的成像对比度最高，如右图所示。

本节给出的是干式光刻的例子，光刻胶的折射率为 1.71，光刻胶顶部空气的折射率为 1.0。与空气中偏振对成像对比度的影响相比，光在空气 / 光刻胶界面上的折射减小了光在光刻胶内的传播角度，减弱了偏振对光刻胶中成像对比度的影响。浸没式光刻中界面两侧的材料为水 ( $n=1.44$ ) 和光刻胶 ( $n \approx 1.7$ )，衍射对偏振影响的削弱效果不如在干式光刻中明显。换句话说，在相同的工艺因子  $k_1$  下，浸没式光刻的偏振效应比干式光刻更明显。在 EUV 光谱范围内，所有材料的折射率都接近 1。偏振效应会完整地传递到光刻胶上。

关于高 NA 空间像仿真和相关效应的更详细讨论超出了本书的范围。更系统的数学和物理解释可以见 Yeung 等人<sup>[32, 33]</sup>、Flagello 和 Rosenbluth<sup>[34]</sup>、Totzeck 等人<sup>[35]</sup>的文章，以及 Yen 和 Yu<sup>[36]</sup>最近出版的著作。

## 8.4 步进扫描投影光刻机中的其他成像效应

扫描过程中，掩模和硅片的微小振动，以及掩模和硅片运动的不完全同步，都会导致纵向和轴向成像变模糊。通过将未受干扰的像与适当的概率密度函数或模糊核<sup>[37]</sup>进行卷积，可以描述这些效应。像面的扫描运动平均了投影系统不同场点的

像差。将焦面位置进行轻微的移动可以增加焦深，但会降低一定的对比度（参见 4.6 节中有关多焦面曝光技术或 FLEX 的内容）。参考文献 [38] 讨论了几种仿真方法，可以有效地仿真这些效应。

目前为止，我们假设曝光用的光是单色光。实际准分子激光源的带宽只有零点几皮米。这么小的照明带宽会使得焦面位置相对于波长发生微小变化。根据 2006 年文献 [39] 中报道的典型值，每皮米带宽通常会造成  $200 \sim 500\text{nm}$  的离焦。可通过卷积适当的模糊核函数的方法对聚焦模糊进行建模（类似于工件台振动的建模方法；见上一段参考资料）。已通过仿真和实验研究了激光带宽对光刻成像的影响<sup>[39-41]</sup>。

## 8.5 总结

设计与制造方面的约束使得光学系统中波前的变换偏离理想状态。可用泽尼克多项式描述实际波前与理想波前之间的相位偏差。波像差有几种主要类型。波前倾斜会导致与特征尺寸和焦面无关的放置误差。像散导致的焦面偏移与图形方向有关。彗差引入了与图形大小有关的放置误差、旁瓣和其他成像缺陷。球差会导致与图形大小有关的焦面偏移与非对称工艺窗口。高空间频率相位偏差产生随机散射光或杂散光。

光的偏振对高 NA 投影系统至关重要。光刻成像系统的各个部分都可能产生偏振效应。光从空气或浸没液体到光刻胶的耦合也与偏振密切相关。为了理解和优化成像条件，需要通过矢量成像算法和琼斯光瞳对这些效应进行正确建模。非最佳偏振态会导致成像对比度损失。先进的高 NA DUV 步进扫描投影光刻机支持不同的偏振照明模式。

对工件台振动、激光带宽以及其他模糊效应进行正确建模，对于 OPC 非常重要，可以保证 OPC 模型的预测性能。

## 参 考 文 献

- [1] F. Zernike, “Beugungstheorie des Schneidenverfahrens und seiner verbesserten Form, der Phasenkontrastmethode,” *Physica* **1**, 689–704, 1934.
- [2] *CODE V Reference Manual*; see: [www.cadfamily.com/download/Optical/CodeV-Wav/appendixc.pdf](http://www.cadfamily.com/download/Optical/CodeV-Wav/appendixc.pdf).
- [3] P. Liu, M. Snajdr, Z. Zhang, Y. Cao, J. Ye, and Y. Zhang, “A computational method for optimal application specific lens aberration control in microlithography,” *Proc. SPIE* **7640**, 76400M, 2010.

- [4] H. Aoyama, T. Nakashima, T. Ogata, S. Kudo, N. Kita, J. Ikeda, R. Matsui, H. Yamamoto, A. Sukegawa, K. Makino, M. Murayama, K. Masaki, and T. Matsuyama, “Scanner performance predictor and optimizer in further low k<sub>1</sub> lithography,” *Proc. SPIE* **9052**, 90520A, 2014.
- [5] C. Progler and A. K.-K. Wong, “Zernike coefficients: Are they really enough?” *Proc. SPIE* **4000**, 40–52, 2000.
- [6] T. A. Brunner, “Impact of lens aberrations on optical lithography,” *IBM J. Res. Dev.* **41**, 57–67, 1997.
- [7] C. Summerer and Z. G. Lu, “Sensitivity of coma monitors to resist processes,” *Proc. SPIE* **4000**, 1237, 2000.
- [8] S. H. Wiersma, T. D. Visser, and P. Török, “Annular focusing through a dielectric interface: Scanning and confining the intensity,” *Pure Appl. Opt.* **7**, 1237–1248, 1998.
- [9] A. Erdmann, “Topography effects and wave aberrations in advanced PSM-technology,” *Proc. SPIE* **4346**, 345–355, 2001.
- [10] D. G. Flagello, J. de Klerk, G. Davies, R. Rogoff, B. Geh, M. Arnz, U. Wegmann, and M. Kraemer, “Towards a comprehensive control of full-field image quality in optical photolithography,” *Proc. SPIE* **3051**, 672, 1997.
- [11] B. W. Smith and R. Schlief, “Understanding lens aberration and influences to lithographic imaging,” *Proc. SPIE* **4000**, 294, 2000.
- [12] A. Erdmann, M. Arnz, M. Maenhoudt, J. Baselmans, and J. C. van Osnabrugge, “Lithographic process simulation for scanners,” *Proc. SPIE* **3334**, 164, 1998.
- [13] A. Y. Burov, L. Li, Z. Yang, F. Wang, and L. Duan, “Aerial image model and application to aberration measurement,” *Proc. SPIE* **7640**, 764032, 2010.
- [14] P. Dirksen, J. Braat, A. J. E. M. Janssen, and C. Juffermans, “Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **2**(1), 61–68, 2003.
- [15] P. Dirksen, C. Juffermans, R. Pellens, M. Maenhoudt, and P. De Bisschop, “Novel aberration monitor for optical lithography,” *Proc. SPIE* **3679**, 77, 1999.
- [16] G. C. Robins and A. R. Neureuther, “Are pattern and probe aberration monitors ready for prime time?” *Proc. SPIE* **5754**, 1704, 2005.
- [17] K. Lai, C. J. Wu, and C. J. Progler, “Scattered light: The increasing problem for 193-nm exposure tools and beyond,” *Proc. SPIE* **4346**, 1424–1435, 2001.
- [18] C. G. Krautschik, M. Ito, I. Nishiyama, and S. Okazaki, “Impact of EUV light scatter on CD control as a result of mask density changes,” *Proc. SPIE* **4688**, 289, 2002.
- [19] G. F. Lorusso, F. van Roey, E. Hendrickx, G. Fenger, M. Lam,

- C. Zuniga, M. Habib, H. Diab, and J. Word, “Flare in extreme ultraviolet lithography: Metrology, out-of-band radiation, fractal point-spread function, and flare map calibration,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(4), 41505, 2009.
- [20] M. A. van de Kerkhof, W. de Boeij, H. Kok, M. Silova, J. Baselmans, and M. Hemerik, “Full optical column characterization of DUV lithographic projection tools,” *Proc. SPIE* **5377**, 1960, 2004.
- [21] P. P. Naulleau and G. Gallatin, “Spatial scaling metrics of mask-induced line-edge roughness,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**(6), 1903, 2008.
- [22] Y. C. Kim, P. De Bisschop, and G. Vandenberghe, “Evaluation of stray light and quantitative analysis of its impact on lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **4**(4), 43002, 2005.
- [23] D. G. Flagello and A. T. S. Pomerene, “Practical characterization of 0.5 um optical lithography,” *Proc. SPIE* **772**, 6–20, 1987.
- [24] J. P. Kirk, “Scattered light in photolithographic lenses,” *Proc. SPIE* **2197**, 566–572, 1994.
- [25] A. Erdmann and P. Evanschitzky, “Rigorous electromagnetic field mask modeling and related lithographic effects in the low  $k_1$  and ultrahigh NA regime,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **6**(3), 31002, 2007.
- [26] B. Smith, J. Zhou, and P. Xie, “Applications of TM polarized illumination,” *Proc. SPIE* **6924**, 69240J, 2008.
- [27] M. V. Klein and T. E. Furtak, *Optics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1986.
- [28] D. G. Flagello and T. D. Milster, “High-numerical-aperture effects in photoresist,” *Appl. Opt.* **36**, 8944, 1997.
- [29] B. Geh, J. Ruoff, J. Zimmermann, P. Gräupner, M. Totzeck, M. Mengel, U. Hempelmann, and E. Schmitt-Weaver, “The impact of projection lens polarization properties on lithographic process at hyper-NA,” *Proc. SPIE* **6520**, 186–203, 2007.
- [30] J. Ruoff and M. Totzeck, “Orientation Zernike polynomials: A useful way to describe the polarization effects of optical imaging systems,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(3), 31404, 2009.
- [31] M. Mansuripur, “Certain computational aspects of vector diffraction problems,” *J. Opt. Soc. Am. A* **6**(6), 786–805, 1989.
- [32] M. Yeung, “Modeling high numerical aperture optical lithography,” *Proc. SPIE* **922**, 149–167, 1988.
- [33] M. S. Yeung, D. Lee, R. Lee, and A. R. Neureuther, “Extension of the Hopkins theory of partially coherent imaging to include thin-film interference effects,” *Proc. SPIE* **1927**, 452, 1993.
- [34] D. G. Flagello and A. E. Rosenbluth, “Vector diffraction analysis of phase-mask imaging in photoresist films,” *Proc. SPIE* **1927**, 395, 1993.

- [35] M. Totzeck, P. Gräupner, T. Heil, A. Göhnermeier, O. Dittmann, D. Krahmer, V. Kamenov, J. Ruoff, and D. Flagello, “How to describe polarization influence on imaging,” *Proc. SPIE* **5754**, 23, 2005.
- [36] A. Yen and S.-S. Yu, *Optical Physics for Nanolithography*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2018.
- [37] J. Bischoff, W. Henke, J. van der Werf, and P. Dirksen, “Simulations on step & scan optical lithography,” *Proc. SPIE* **2197**, 953, 1994.
- [38] A. Erdmann, M. Arnz, M. Maenhoudt, J. Baselmans, and J. C. van Osnabrugge, “Lithographic process simulation for scanners,” *Proc. SPIE* **3334**, 164, 1998.
- [39] T. A. Brunner, D. A. Corliss, S. A. Butt, T. J. Wiltshire, C. P. Ausschnitt, and M. D. Smith, “Laser bandwidth and other sources of focus blur in lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **5**(4), 1–7, 2006.
- [40] A. Kroyan, I. Lalovic, and N. R. Farrar, “Effects of 95% integral vs. FWHM bandwidth specifications on lithographic imaging,” *Proc. SPIE* **4346**, 1244–1253, 2001.
- [41] P. De Bisschop, I. Lalovic, and F. Trintchouk, “Impact of finite laser bandwidth on the critical dimension of L/S structures,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **7**(3), 33001, 2008.

# 第 9 章 ➤

## 光刻中的掩模形貌效应与硅片 形貌效应

第 4 ~ 6 章介绍了光刻技术的发展、建模与应用。光刻分辨率不断提高，特征尺寸逐渐缩小。波长的缩短推动了光刻技术的发展。通过增大数值孔径以及应用光学邻近效应修正、离轴照明、相移掩模等光学分辨率增强技术，大大降低了光刻特征尺寸与曝光波长之间的比值。

图 9.1 第一行显示了不同类型典型掩模图形的尺寸。图中坐标轴标注的尺寸单位为曝光波长。标准的玻璃 - 铬掩模（不经过光学邻近效应修正）常用于数值孔径小于 0.7、工艺因子  $k_1 \geq 0.8$  的光刻成像。由于光刻投影系统采用了  $4 \times$  缩小倍率，掩模上吸收层图形的尺寸一般是波长的几倍（如左上图所示）。低  $k_1$  成像需要采用光学邻近效应修正技术。该技术会引入辅助衬线（亚分辨率辅助图形，SRAF）等新的吸收层图形。这些图形的尺寸与波长相当（如中上图所示）。光源掩模优化技术产生了像素化掩模图形<sup>[1]</sup>，特征尺寸一般小于波长（如右上图所示）。

图 9.1 第二行为以波长为单位的掩模厚度数据，坐标轴单位为波长。标准掩模上铬材料的厚度约为 80nm，小于最先进 DUV 光刻曝光波长（193nm）的一半（左下图）。AltPSM 掩模上刻蚀沟槽的深度与波长大小相近（中下图）。EUV 掩模（见第 6 章）上的吸收层厚度为 60 ~ 80nm，相当于 4 ~ 5 个波长（ $\lambda=13.5\text{nm}$ ）（右下图）。

2.2.1 节利用基尔霍夫边界条件描述光经过掩模的衍射现象。该方法假设掩模无限薄，仅利用掩模几何图形计算掩模的透射场，忽略了掩模形貌以及吸收层边缘的衍射光。当掩模图形（横向）尺寸与波长相当或者小于波长或者 / 并且掩模厚度为波长量级时，需要采用严格电磁场仿真方法计算掩模衍射光，实现精确建模。

前几章中用到的一种重要方法涉及硅片膜层。8.3.3 节采用菲涅耳公式和传输矩阵法描述光在平面硅片膜层中的传播。光刻胶以及其下面的材料层被看作均匀平

面层。事实上光刻并不只在平面基底上进行，大多数光刻步骤在有图形的基底上进行。通常，采用抗反射涂层（BARC）抑制底层非平面层的反射光，减小反射对光刻胶内光强分布的影响。

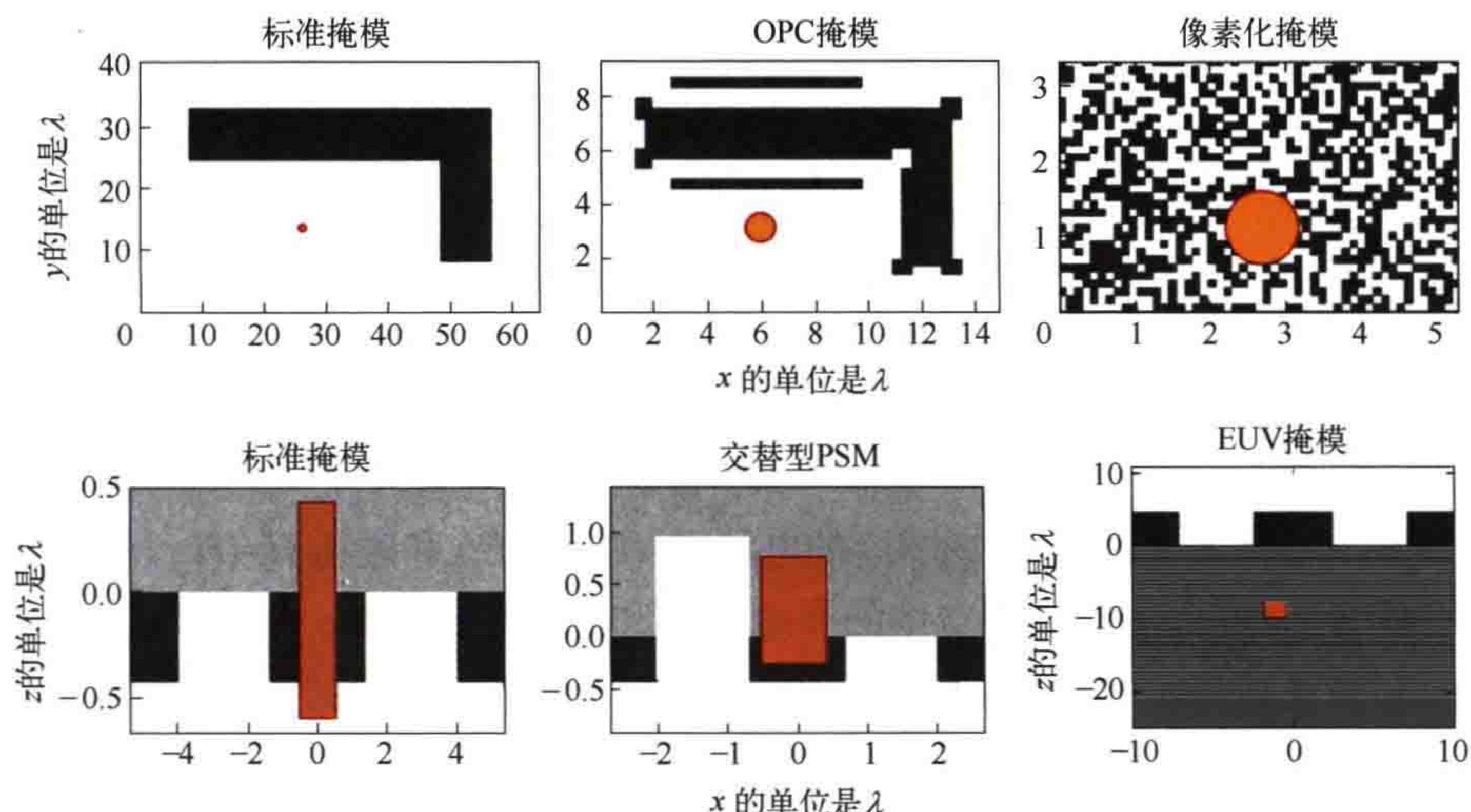


图 9.1 典型掩模图形相对于波长的特征尺寸和厚度值。第一行：不进行 OPC 的标准掩模、进行了简单 OPC 的掩模以及像素化掩模的尺寸。第二行：标准掩模（铬）、交替型 PSM 和 EUV 掩模的厚度尺寸。波长大小分别用上下两行中的圆和长条表示

先进光刻技术中存在几种常用的曝光场景和硅片膜层。在这些应用场景和膜层中 BARC 不足以抑制硅片膜层内非平面层的影响。离子注入层的光刻不能使用标准的不可显影 BARC。此外，BARC 的有效性取决于其厚度和入射光的角度范围。沉积到非平面硅片上的 BARC 厚度不一致，对反射光的抑制效果随着厚度的变化而变化。光刻机 NA 较大时，硅片上光线的入射角度范围很大。由于一种 BARC 只对入射角在一定范围内的入射光有效，所以超出范围的入射光将被反射。双重图形和双重曝光技术的应用产生了许多不均匀光刻胶层，并限制了 BARC 的有效性。所有这些光刻场景都需要对硅片上微小形貌图形的衍射光进行严格建模。

本章概述了电磁场（EMF）仿真方法在光刻中的应用以及相应的掩模、硅片形貌引起的衍射效应。首先简要概述 EMF 仿真方法及其在光刻中的应用。然后研究掩模的重要衍射效应。这些效应被称为掩模形貌效应、3D 掩模效应或掩模 3D 效应。本书使用掩模形貌效应这一术语。这些效应包括与传统基尔霍夫方法（假设掩模无限薄）的仿真结果相比衍射光振幅、相位和偏振态的变化，以及 EUV 光刻掩模形貌特有的效应。最后一部分介绍了与硅片散射有关的衍射效应，即所谓的硅片形貌效应，此效应在先进光刻技术中变得越来越重要。

## 9.1 严格电磁场仿真方法

掩模和硅片的表面形貌与光的相互作用可通过麦克斯韦方程组描述。掩模和硅片上的材料一般是非磁性、各向同性介质。掩模和硅片不包含电流源。因此，麦克斯韦方程组可以写成：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (9.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\epsilon_0 \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \quad (9.2)$$

$$\nabla(\epsilon \mathbf{E}) = 0 \quad (9.3)$$

$$\nabla \mathbf{H} = 0 \quad (9.4)$$

这些方程将关于空间  $\mathbf{r}$  和时间  $t$  的电场  $\mathbf{E}=(E_x, E_y, E_z)$  和磁场  $\mathbf{H}=(H_x, H_y, H_z)$  统一起来，常量  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空中的介电常数和磁导率， $\epsilon$  和  $\sigma$  分别表示仿真区域与材料和位置相关的介电常数和电导率，它们包含掩模或硅片的几何形状信息。

给定几何形状、材料参数、边界条件和入射光场，EMF 仿真方法可利用适当的数值方法求解麦克斯韦方程组。入射场是照射到掩模或硅片上的平面波。常见的边界条件假设有限大小的仿真区域在横向方向，即平行于掩模与硅片平面 ( $x$  与  $y$ ) 的方向，具有周期性。垂直方向 ( $z$ ) 上采用透明边界条件，确保光不会被反射回入射端或者不会在硅片面发生反射。

本书采用了不同的 EMF 仿真方法描述掩模和硅片对光的散射。下文将介绍光刻仿真最常用的方法——时域有限差分 (FDTD) 方法和波导法。此外，有限元方法 (FEM)<sup>[2-4]</sup>、有限积分技术 (FIT)<sup>[5]</sup> 和伪谱时域方法 (PSTD)<sup>[6]</sup> 也已用于光刻仿真。这些方法的细节请见引用的文献。

麦克斯韦方程组一般将电场和磁场的所有六个分量耦合在一起。需要求解整个麦克斯韦方程才能描述三维散射问题。二维散射问题是一种重要的特殊情况，含六个场分量的麦克斯韦方程组被解耦为两个相互独立、各含有三个场分量的微分方程组。如果几何结构和入射场分量在一个横向方向上恒定，上述情况就会发生。假设几何结构和场在  $y$  方向不变，式 (9.1) 和式 (9.2) 可以改写为两个解耦的微分方程组：

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial E_y}{\partial t} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial t} - \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma E_y \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_0} \left( -\frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (9.5)$$

式(9.5)对应于TE偏振光或者y偏振光,场分量为 $H_x$ 、 $E_y$ 、 $H_z$ 。

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial H_y}{\partial z} + \sigma E_x \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} + \sigma E_z \right)\end{aligned}\quad (9.6)$$

式(9.6)对应于TM偏振光或x偏振光,场分量为 $E_x$ 、 $H_y$ 、 $E_z$ 。这些方程描述了TE偏振光和TM偏振光照明条件下y方向线空图形的衍射。求解二维衍射问题比求解完整的三维问题需要的计算资源更少。下面几小节中给出的大都是这类二维衍射问题的例子和解释。3D实例可以参考引用的文献。

### 9.1.1 时域有限差分法

时域有限差分(FDTD)法的基本思想是将式(9.1)和式(9.2)对时间进行积分<sup>[7]</sup>。在交错网格上对电场分量和磁场分量进行数值积分。在这种交错网格上,TE方程式(9.5)的有限差分公式为:

$$\begin{aligned}H_x|_{i,j}^{m+1/2} &= H_x|_{i,j}^{m-1/2} + D|_{i,j} \left( E_y|_{i,j+1}^m - E_y|_{i,j}^m \right) \\ E_y|_{i,j}^{m+1} &= C_a|_{i,j} E_y|_{i,j}^m + C_b|_{i,j} \left( H_x|_{i,j}^{m+1/2} - H_x|_{i-1,j}^{m+1/2} - H_z|_{i,j}^{m+1/2} - H_z|_{i,j-1}^{m+1/2} \right) \\ H_z|_{i,j}^{m+1/2} &= H_z|_{i,j}^{m-1/2} - D|_{i,j} \left( E_y|_{i+1,j}^m - E_y|_{i,j}^m \right)\end{aligned}\quad (9.7)$$

式中,整数*i*和*j*表示在均匀网格上的位置;整数*m*表示时间步长。

$$\begin{aligned}C_a|_{i,j} &= \left( 1 - \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2 \epsilon_0 \epsilon_{i,j}} \right) \left( 1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2 \epsilon_0 \epsilon_{i,j}} \right)^{-1} \\ C_b|_{i,j} &= \left( \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \epsilon_{i,j} \Delta x} \right) \left( 1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2 \epsilon_0 \epsilon_{i,j}} \right)^{-1} \\ D|_{i,j} &= \left( \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \right) \left( 1 + \frac{\rho_{i,j} \Delta t}{2 \mu_0} \right)^{-1}\end{aligned}\quad (9.8)$$

更新系数 $C_a$ 、 $C_b$ 和 $D$ 的值取决于均匀时间步长 $\Delta t$ 、空间离散间隔 $\Delta x=\Delta y$ 等数值参数以及离散网格上的材料属性( $\epsilon_{i,j}$ , $\rho_{i,j}$ )。为保证算法的数值稳定性,时间步长 $\Delta t$ 与空间离散间隔 $\Delta x$ 之间需要满足以下关系:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2\mu_0\epsilon_0}}$$

式(9.7)和式(9.8)为电场和磁场分量随时间变化的更新方程。这些方程给出了利用第  $m-1$  时刻的场分量计算第  $m$  时刻电场和磁场分量的方法。磁场分量的上标  $1/2$  表示电场和磁场分量的时间步长存在交错。TM 偏振照明条件下的 2D 问题和一般的 3D 问题也具有类似的表达式(参见参考文献[8])。场分量在空间和时间上的交错保证了得到的解可同时满足其余两个麦克斯韦方程[式(9.3)和式(9.4)]。

许多实际应用中,需要将 FDTD 与其他技术相结合使用。这些组合方法包括强吸收材料建模中使用的 Luebbers 方法<sup>[9]</sup>、对透明边界条件高效建模的完美匹配层法<sup>[10]</sup>,以及在仿真域中有效激发电磁场的全/散射场方法。Taflove 的书<sup>[8]</sup>对这些技术进行了解释,给出了许多关于 FDTD 电磁场仿真技术实现和应用方面的细节。Alfred Wong 最早将 FDTD 方法应用于光刻掩模衍射光的严格仿真<sup>[11]</sup>。

图 9.2 为 FDTD 仿真得到光强随着积分时间的变化。掩模几何结构如左上图所示。光线从顶部入射。积分时间为理论时间的 10% 时,入射光到达 AltPSM 的刻蚀沟槽。部分光线被沟槽底部反射,产生驻波。仿真时间为 15% 时,光到达玻璃基底底部。玻璃基底/铬界面的强反射对掩模基底相应区域的驻波产生强烈调制。相比之下,玻璃基底/空气界面上方的驻波不太明显。15% 的理论仿真时间后,光开始在掩模下面的空气中传播。到达理论积分时间后达到稳态,掩模附近的近场强度分布不再变化。当达到稳态时,可以提取掩模的透射近场,用于后续的成像仿真。

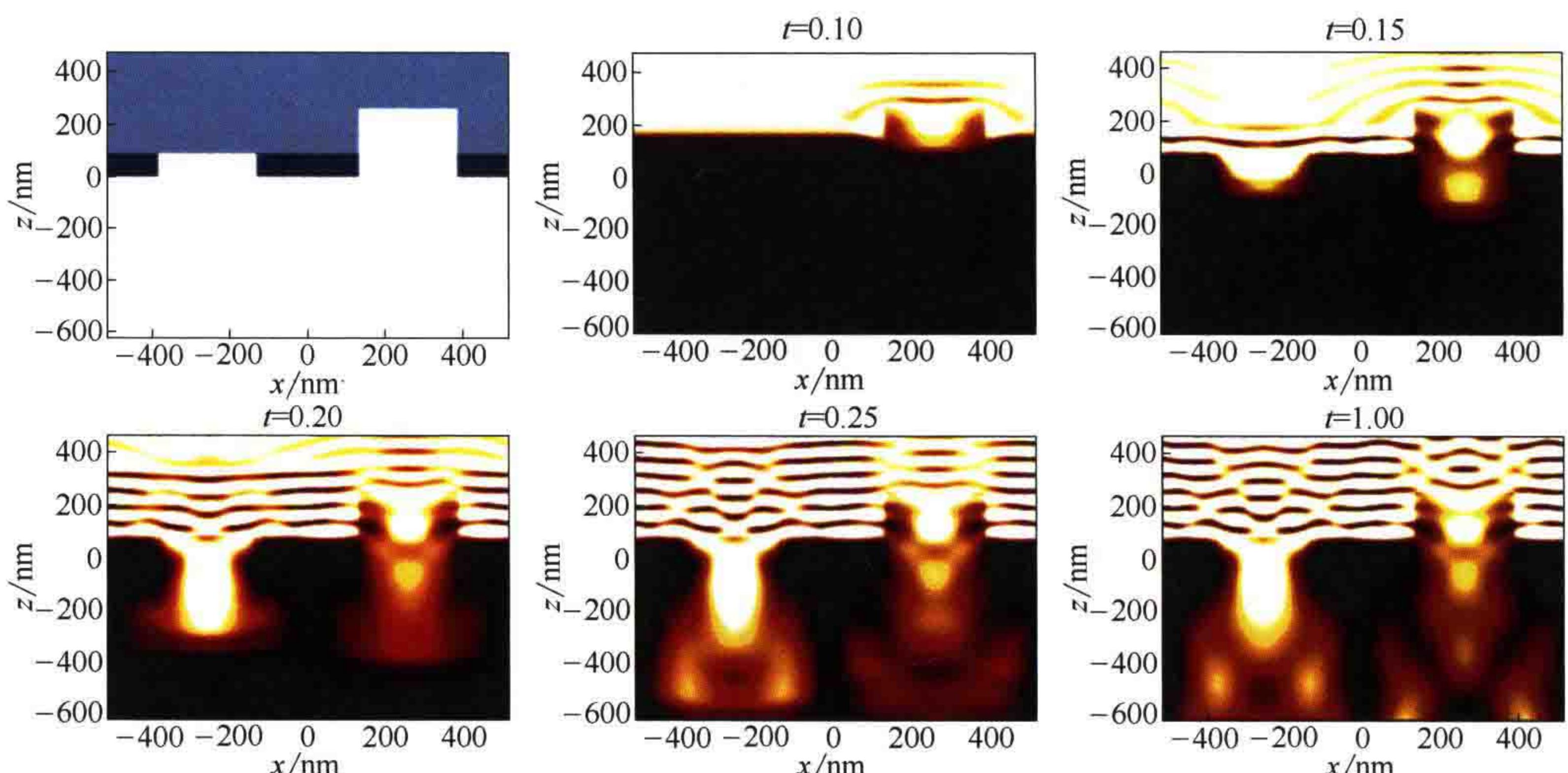


图 9.2 AltPSM 中光传播的 FDTD 仿真, 左上角为掩模的几何结构, 其他几幅子图显示了不同时刻仿真区域内的电场强度。FDTD 积分时间在图的上方(任意单位)。

设置:  $\lambda=193\text{nm}$ , X 偏振或 TM 偏振垂直入射,  $4 \times 65\text{nm}$  线宽,  $p=4 \times 130\text{nm}$

FDTD 是一种空域方法，需要在均匀网格上描述图形的几何形状，如图 9.3 左侧所示。均匀网格和掩模几何形貌决定了计算结果的准确性。亚像素技术<sup>[12]</sup> 和网格局部细分技术<sup>[13]</sup> 可以减少离散误差。

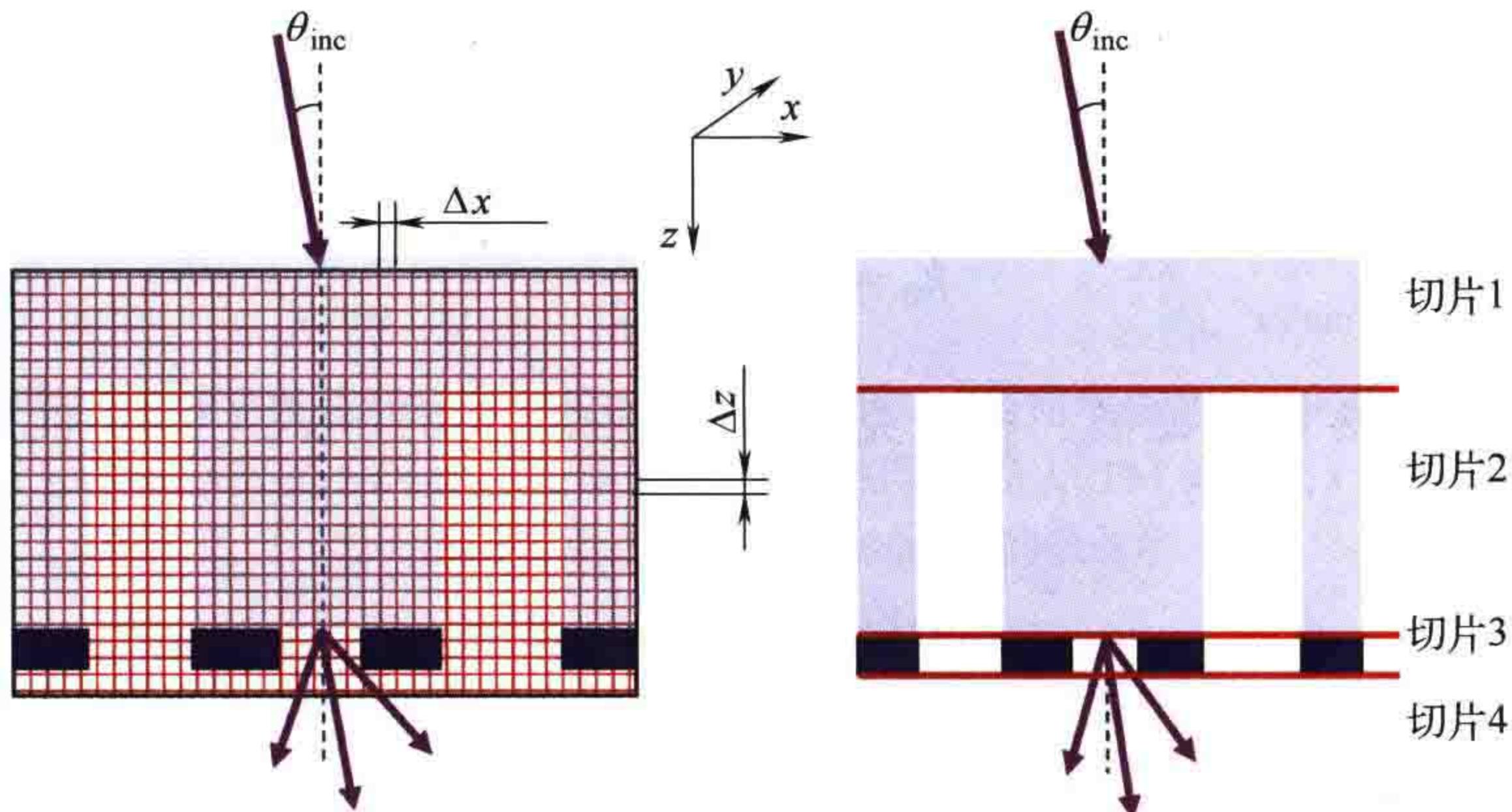


图 9.3 FDTD (左) 和波导法 (右) 对光刻掩模几何结构的描述方法

FDTD 是一种非常灵活的方法，可以应用于任意几何形状和入射场条件下的计算，而且使用方便。FDTD 的准确性取决于几个数值参数，包括 FDTD 网格的空间离散间隔  $\Delta x$  ( $=\Delta y=\Delta z$ )、积分时间，以及边界条件和色散关系公式中的其他参数。FDTD 的计算量与仿真区域的大小呈线性关系。

### 9.1.2 波导法

波导法在空间频率域内求解给定波长单色光的电磁场衍射计算问题。将电磁场和几何图形进行傅里叶级数展开，得到描述傅里叶分量传播和相互之间耦合关系的线性方程组，求解该方程组得到电磁场。波导法的数学公式请见 Lucas 等人的文章<sup>[14]</sup>。

波导法几乎与严格耦合波分析 (RCWA) 相同。20 世纪 80 年代初，这两种方法 (RCWA<sup>[15]</sup>、波导法<sup>[16]</sup>) 各自被独立提出，并在不同研究领域得到发展。RCWA 主要用于分析面向不同应用的各种衍射光栅，而波导法最初是为了精确仿真光刻掩模和硅片图形的显微成像。傅里叶模态法 (FMM) 是一种类似的方法，相比之下它增加了  $z$  向的傅里叶展开。参考文献 [17] 对这些方法进行了综述。因为本书主要面向对光刻感兴趣的读者，所以下面的讨论中使用了术语“波导法”。事实上，波导法也应用了 FMM/RCWA 的许多技术思路<sup>[18, 19]</sup>。

FDTD 在空域计算光的衍射，而波导法是在空间频率域进行计算，求解时谐形式的麦克斯韦方程组。将光场表示为时间变量的显式表达式：

$$\tilde{A} = A \exp(-i\tilde{\omega}t)$$

并引入复介电常数

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - i \frac{\sigma}{\tilde{\omega}}$$

和一个自由空间中的空间频率

$$\tilde{k}_0 = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \frac{2\pi\tilde{\omega}}{\lambda}$$

对于波长为  $\lambda$  的电磁波，将麦克斯韦方程式 (9.1)~式 (9.4) 代入亥姆霍兹波动方程得到：

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \tilde{k}_0^2 \tilde{\varepsilon} \mathbf{A} = 0 \quad (9.9)$$

该式对电场和磁场都有效。波导法将物体分割为一定数量的薄层，在各薄层  $z$  向分布均匀的条件下，求解亥姆霍兹波动方程，如图 9.3 的右侧所示。波导状薄层  $s$  内电磁场和复介电常数的傅立叶级数展开式为：

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^s &= \sum_{l,m} \mathbf{a}_{l,m}^s \exp[-i(\tilde{k}_{l,m}^x x + \tilde{k}_{l,m}^y y)] \\ \tilde{\varepsilon}^s &= \sum_{l,m} \tilde{\varepsilon}_{l,m}^s \exp[-i(\tilde{k}_{l,m}^x x + \tilde{k}_{l,m}^y y)] \end{aligned}$$

上述线性方程中电磁场系数  $\mathbf{a}_{l,m}^s$  是未知量。利用方程组中有限数量的傅里叶展开系数构建传递矩阵连接薄层上下边界的场分量。将传递矩阵法进行扩展，得到波导法求解散射问题的方法。在大多数应用案例中波导法都会引入特殊的场势<sup>[14]</sup>，以及通过改变傅里叶级数数量提高收敛性的技术<sup>[20, 21]</sup>。

图 9.4 为对电磁场进行傅里叶级数展开后，取不同数量的波导级次或者傅里叶变换系数对二元铬掩模近场透射光的仿真结果。波导级数 (wgOrder) 定义了正负两个方向上傅里叶变换系数的数量，比如波导级数 wgOrder=10 时傅里叶变换系数为 -10 级到 +10 级。为了正确地仿真近场，TM 偏振光比 TE 偏振光需要的波导级数更大。进一步研究表明，TM 偏振照明条件下只有在仿真倏逝波的时候才需要额外的傅里叶展开系数（见 7.3.1 节关于倏逝波及其潜在应用的讨论）。对典型光刻掩模，改变 wgOrder 的值，分析波导法的收敛性，结果表明 TE 偏振和 TM 偏振照明模式之间没有明显差异。

如本例所示，波导法仿真的准确性取决于场的傅里叶级数或波导级数。所需的波导级数取决于波长  $\lambda$ 、掩模面周期  $p$ 、材料最小 / 最大折射率之间的差异以及消光系数。经验设置方法是：

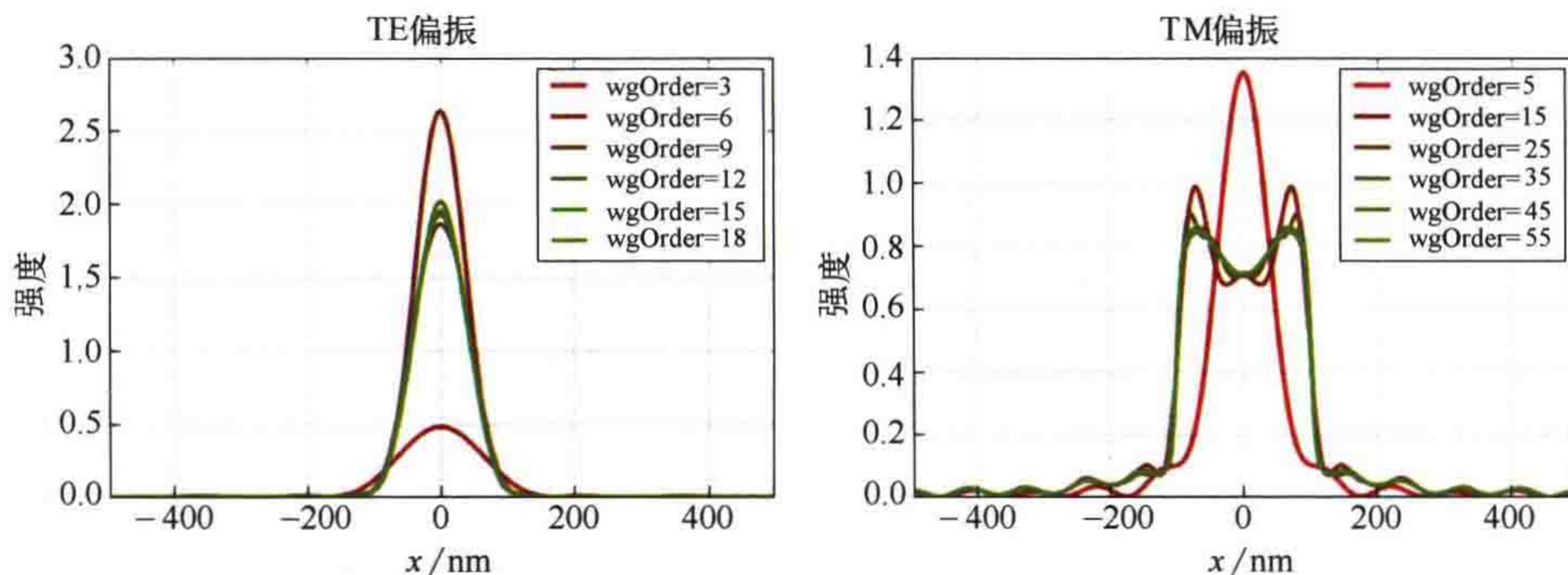


图 9.4 不同数量傅里叶展开系数 (wgOrder) 情况下二元铬掩模透射近场的波导法仿真结果。掩模周期 1000nm, 缝宽 200nm, TE 偏振或  $y$  偏振照明 (左), TM 偏振或  $x$  偏振照明 (右),  $\lambda=193\text{nm}$ , 垂直入射光, 80nm 厚的吸收层

$$\text{wgOrder} = \frac{3p}{\lambda}, \text{ 对于可见光/DUV光谱范围的材料} \quad (9.10)$$

$$\text{wgOrder} = \frac{p}{2\lambda}, \text{ 对于EUV光谱范围的材料}$$

波导法的计算时间和内存需求取决于波导级数和非均匀薄层的数量。在大多数实际案例中，都可以将光波正确地描述为关于时间的单色波，都可以精确地描述薄层内的几何结构，使得波导法在光刻仿真中的表现优于 FDTD。这两种方法的详细比较可参考文献 [22]。

标准波导法在计算量随仿真面积的增长方式方面存在不足，特别是在三维仿真中。一般来说，FDTD 的计算量随  $x$  向和  $y$  向仿真面积的增大而线性增加。而波导法的计算量按照  $\text{wgOrderX}^3 \times \text{wgOrderY}^3$  的关系增加，这里  $\text{wgOrderX}$  和  $\text{wgOrderY}$  分别是  $x$  和  $y$  方向的波导级数，与相应的掩模尺寸或周期成比例 [ 参见式 (9.10) ]。利用 9.2.5 节和参考文献中介绍的分解技术，可以一定程度上解决这种不利的增长方式带来的问题。

## 9.2 掩模形貌效应

图 9.5 显示了基尔霍夫方法与严格电磁场 (EMF) 的仿真结果之间的区别。基尔霍夫方法假定掩模为无限薄，根据掩模图形直接得到掩模透射光。无吸收层区域的透射率为 1.0，铬覆盖区域的透射率为 0。整个掩模透射光的相位是常数。

严格 EMF 仿真可以计算吸收层图形附近的光强和相位。入射光与来自基底 / 吸收层界面的反射光之间的干涉产生了驻波，如图 9.5 左上方和右上方所示。部分光透过吸收层的刻蚀开口，向投影物镜传播。透射光的相位类似于从掩模开口出射

的柱面波。在吸收层的下方直接提取透射近场的强度和相位。与基尔霍夫方法不同，透射光的强度和相位都沿  $x$  轴连续变化。

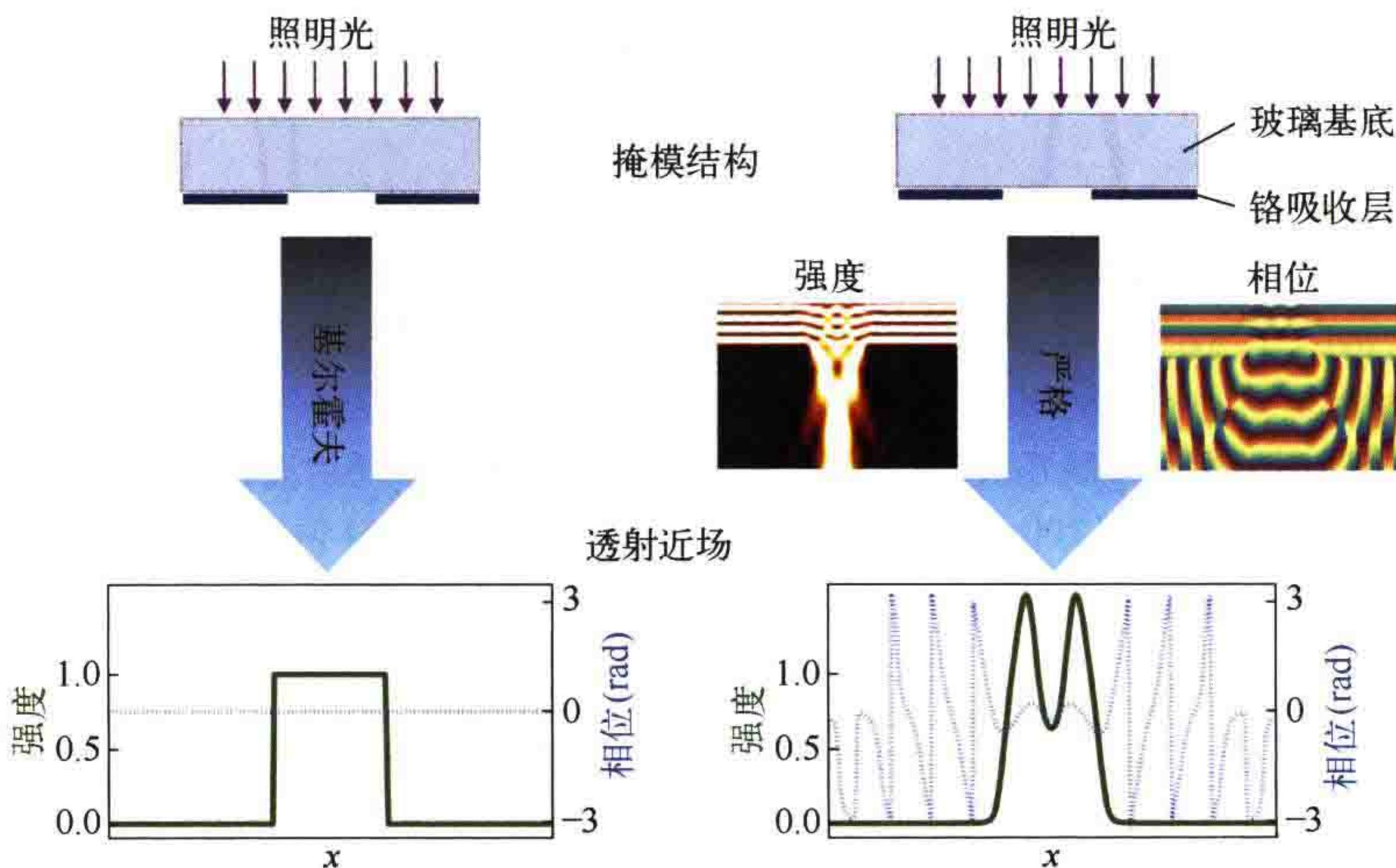


图 9.5 二元光学掩模透射光的仿真结果：基尔霍夫方法（左）和严格电磁场仿真方法（右）。  
改编自参考文献 [23]

两种掩模建模方法仿真得到的透射光相差很大。但是，不是所有的差异都对掩模远场光斑重要。造成差异的另一个原因是倏逝波不会传播到远场。此外，投影物镜的数值孔径起到带通滤波器的作用，会滤除一部分差异。接下来的两节研究远场衍射光和光刻投影系统所成的像。

### 9.2.1 掩模衍射分析

首先我们考虑平面波照明条件下周期性线空图形的衍射。掩模衍射分析主要是研究各衍射级的强度、相位与偏振、周期和入射角的关系。分析结果可以用于确定需要严格电磁场仿真的应用条件，有助于深入理解掩模形貌引起的成像缺陷。除了可用于系统地研究掩模材料和几何结构带来的影响之外，掩模衍射分析还可以用于设计消除或利用掩模形貌效应的方法。

如图 9.6 所示，周期性图形将入射光衍射为几个离散的衍射级。令周期为  $p$ 、波长为  $\lambda$ ，则离散衍射级或衍射角的方向可由光栅方程给出：

$$\sin \theta_m = \sin \theta_{\text{inc}} + m \frac{\lambda}{p} \quad (9.11)$$

式中， $m$  为衍射级序数。对于给定的周期和波长，只有有限数量衍射级的衍射角  $\theta_m$  为实数，可向前传播。垂直入射条件下 ( $\theta_{\text{inc}}=0^\circ$ )，这个衍射级数量可由如下表达式得出：

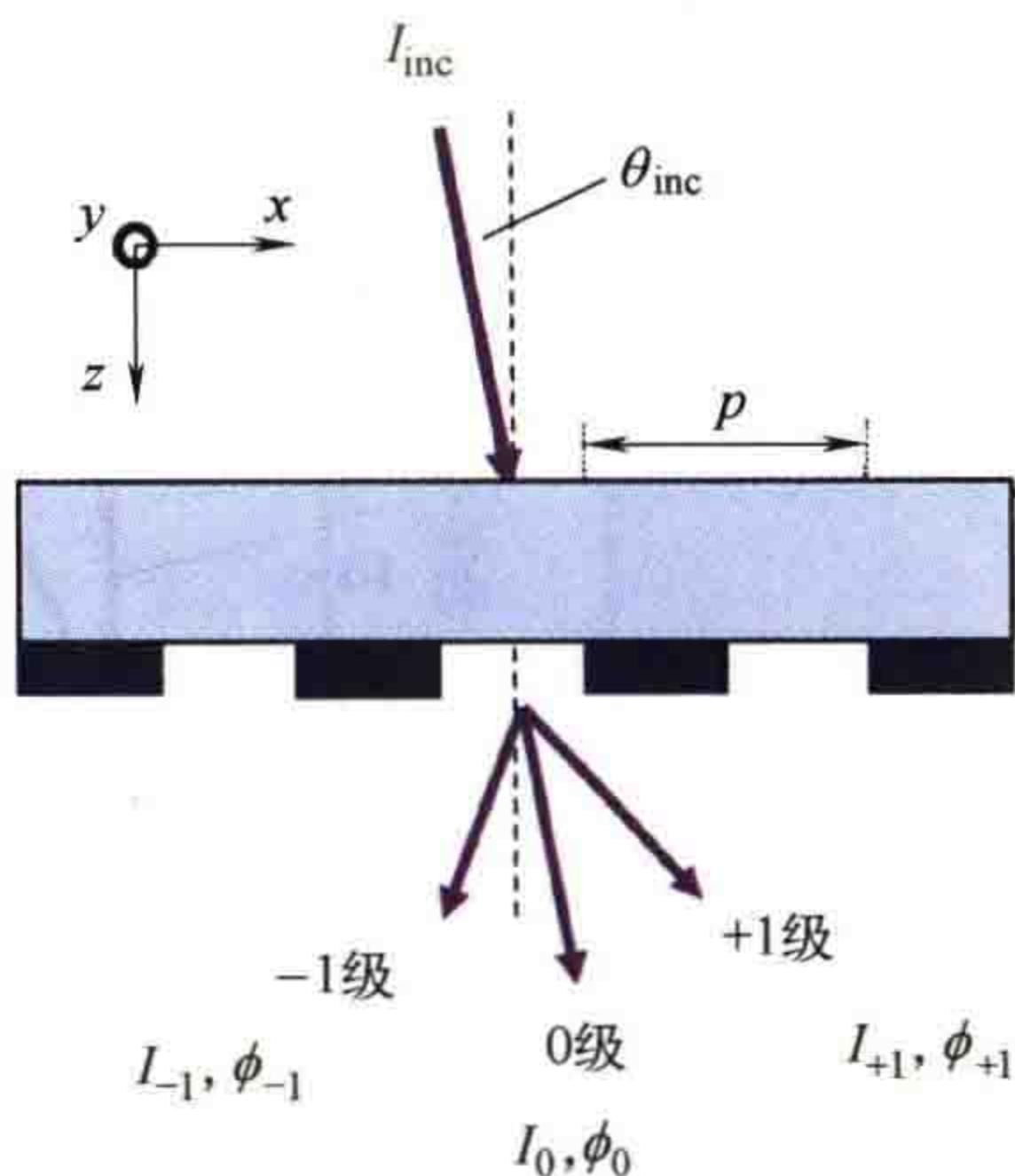


图 9.6 掩模衍射分析的光路图。TE 偏振或者  $y$  偏振是沿着  $y$  轴的电场矢量。  
TM 偏振或者  $x$  偏振光是沿着与  $xz$  面垂直方向的电场矢量

$$\left| m \frac{\lambda}{p} \right| \leq 1$$

可以利用衍射效率以及各级次相对于 0 级衍射光的相位差对衍射分析获得的数据进行评估，衍射效率的公式为：

$$\eta_m = \frac{I_m}{I_{\text{inc}}} \quad (9.12)$$

各衍射级次与 0 级衍射光之间的相位差表示为：

$$\Delta\phi_m = \phi_m - \phi_0 \quad (9.13)$$

同时，利用偏振分数表征掩模的偏振性能<sup>[24]</sup>：

$$\text{FPOL}_m = \frac{\eta_m^{\text{TE}} - \eta_m^{\text{TM}}}{\eta_m^{\text{TE}} + \eta_m^{\text{TM}}} \quad (9.14)$$

该参数描述了第  $m$  级 TE 或 TM 偏振光中非偏振成分的多少。偏振分数  $\text{FPOL}_m=1.0/-1.0$  时掩模可作为第  $m$  级衍射光的 TE/TM 起偏器。 $\text{FPOL}_m=0.0$  表示两种偏振光的衍射效率相同。

图 9.7 为 MoSi 衰减型相移掩模（AttPSM）的衍射分析结果。从中可以看出垂直入射 ( $\theta_{\text{inc}}=0^\circ$ ) 条件下占空比（线宽和周期之比）为 1 : 2 的密集线图形的 0 级和 1 级衍射光的特点。周期值采用了掩模面尺寸。对于  $4\times$  缩小系统，换算为硅片面周期（和尺寸）时需要除以 4。采用基尔霍夫方法预测的零级衍射效率为恒定值，其值对应于掩模的平均透过率。只有当周期大于波长 193nm 时第一级衍射光才向前传播。除了这一截止特性之外，一级衍射光的大小为恒定值。

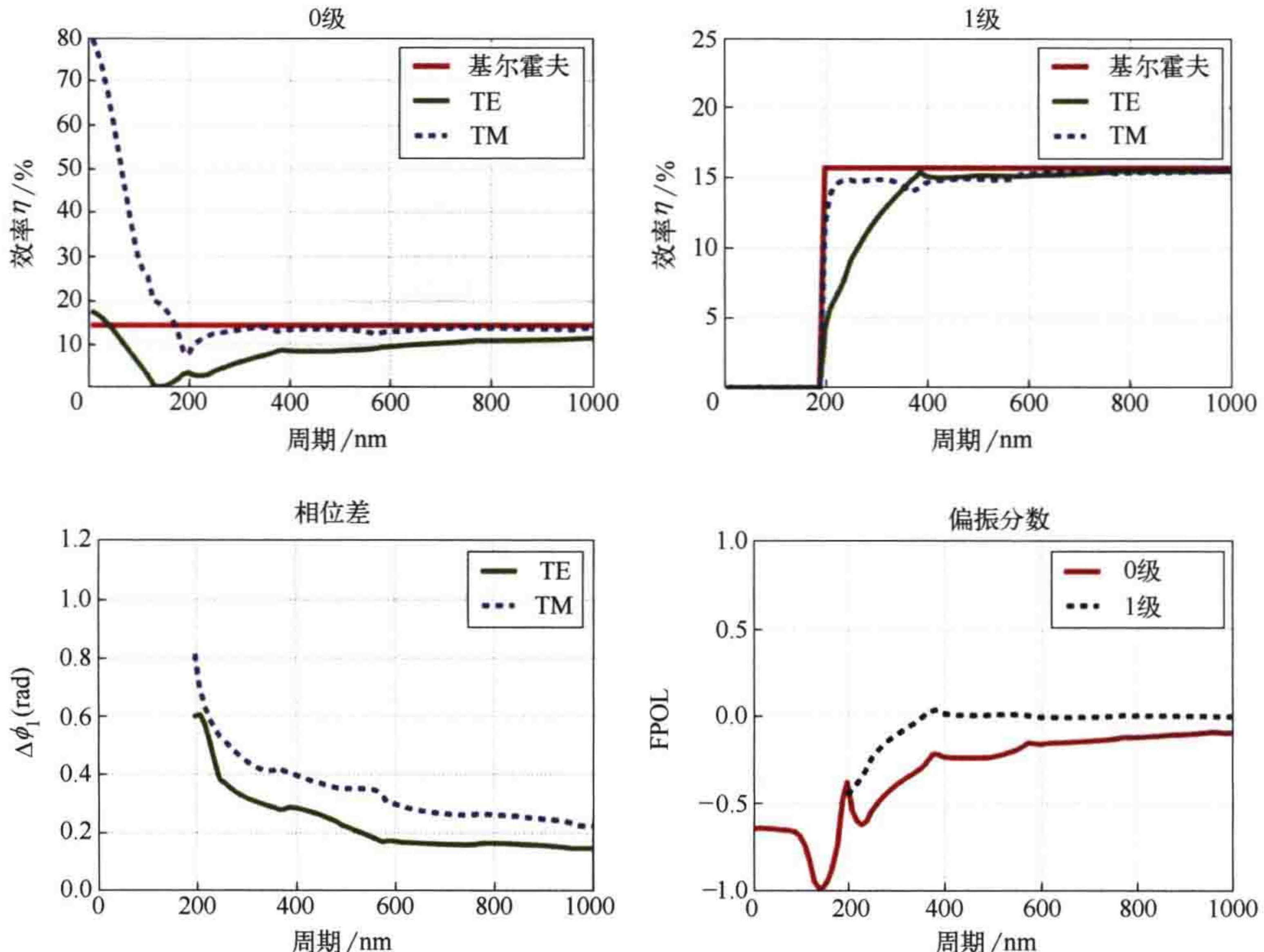


图 9.7 MoSi 衰减型相移掩模的衍射分析，图形为线空图形，横坐标为周期。

左上图为0级衍射光的衍射效率。右上图为1级衍射光的衍射效率。左下图为0级和1级衍射光的相位差。

右下图为偏振分数。设置： $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\phi_{\text{inc}}=0.0^\circ$ , MoSi 层厚度为 68nm  
( 折射率  $n=2.343$ , 消光系数  $k=0.586$  ), 石英基底 ( $n=1.563$ ,  $k=0.0$ )

相比之下，严格 EMF 仿真可以预测与偏振和周期相关的衍射效率。周期较大时，严格计算的衍射效率与基尔霍夫方法的计算结果接近。即，当掩模面周期大于 800nm 时基尔霍夫方法的仿真精度可以接受。这时硅片面周期为 200nm，线宽为 100nm。当尺寸减小时，基尔霍夫方法的仿真精度不足。

严格 EMF 仿真表明 TM 偏振光的衍射效率高于 TE 偏振光。从图 9.7 右下方的偏振分数图中也可以看出这一点。特征尺寸很小时 MoSi 掩模起到了 TM 起偏器的作用。而高数值孔径系统的成像需要 TE 偏振光（见 8.3.2 节）。显然这与成像的需求相矛盾。MoSi 型掩模对光的这种不利衍射特性有时被称为“MoSi 危机”。铬和其他掩模吸收层材料的偏振特性更好<sup>[25, 26]</sup>。

在图 9.7 左下角的相位图中可以观察出掩模衍射的另一个重要特征。图形周期小于 600nm 时，掩模形貌引入了与周期有关的相位效应，可以在远场衍射光中观察到。它们对成像性能的影响类似于投影物镜的波像差<sup>[27]</sup>。下几节将讨论几种掩模像差效应及其对光刻成像的影响。

也可以对其他类型的掩模和材料进行类似的分析<sup>[28]</sup>。分析结果表明，特征尺寸达到或小于波长量级的掩模类似于散射物体，对衍射光振幅和相位的影响与偏振有关。

## 9.2.2 斜入射效应

掩模对光的衍射不仅与掩模形貌和材料特性有关，还与入射光方向密切相关。掩模上入射光的角度范围由下式给出：

$$\sin \theta_{\max} = \frac{\sigma_{\max} NA}{M n_s} \quad (9.15)$$

式中， $\theta_{\max}$  是入射光的最大张角；NA 是物面或者硅片面数值孔径；M 是光刻机的缩小倍率； $n_s$  是掩模基底的折射率。DUV 照明的入射角范围相对于  $\theta=0^\circ$  的光轴对称。EUV 光刻机的入射角范围取决于特征图形的方向。对于垂直图形，入射角也关于  $\theta=0^\circ$  对称；对于水平图形，入射角范围随 CRAO 的变化而变化。

图 9.8 为不同数值孔径 DUV 和 EUV 光刻中密集线空图形衍射效率的典型值（仿真结果）。为了使工艺因子  $k_1$  的大小差不多，仿真中对特征尺寸进行了缩放。为了清楚地显示对比结果，将 EUV 吸收层材料放置在真空中（无多层膜）。考虑到光两次穿过吸收层（分别在多层膜反射之前和之后），吸收层厚度值中设置了因子 2。

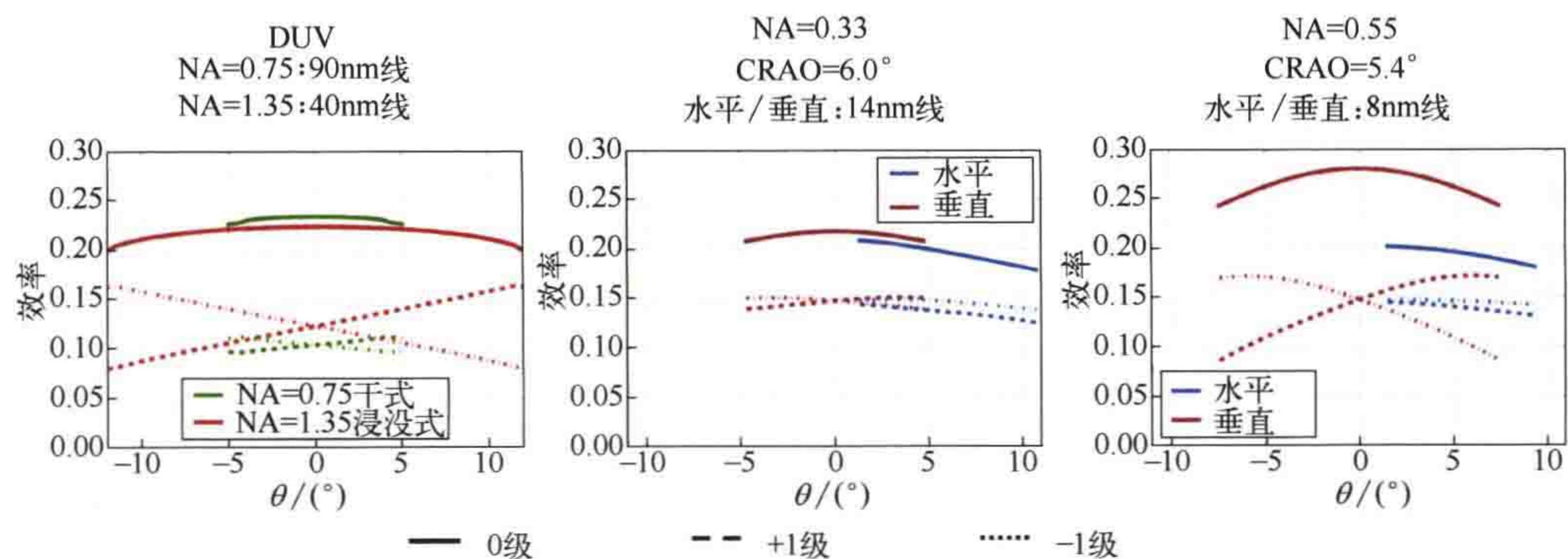


图 9.8 在典型入射角范围内对 DUV 和 EUV 密集线空图形的衍射效率仿真结果。左图为干式和浸没式 DUV 光刻；中图为 EUV 光刻水平和垂直线条的仿真结果，NA=0.33；右图为 EUV 光刻水平和垂直线条，NA=0.55。吸收层参数：DUV 吸收层为 73nm 厚的 Cr，EUV 吸收层为  $2 \times 56\text{nm}$  厚的 TaBN

首先，我们讨论从 DUV 光刻中观察到的现象。入射角  $\theta_{\max}$  小于  $5^\circ$  时，掩模衍射光几乎不受掩模上入射光方向变化的影响。在这个入射光方向范围内，可以将垂直照明条件下的衍射光谱进行简单平移得到斜入射时的衍射光谱。只需要一次严格 EMF 仿真就可以准确计算部分相干照明条件下的光刻成像。这种利用掩模衍射的平

移不变性进行成像仿真的方法通常被称为霍普金斯方法。式(9.15)表明霍普金斯近似可应用于数值孔径小于0.8的系统和 $\sigma$ 较小的高数值孔径系统。

强离轴照明高数值孔径DUV光刻的入射角范围更大，不能采用霍普金斯方法。在此入射角范围内，0级光和1级光的衍射效率都表现出了明显的变化。同时，较厚的吸收层材料（与波长相比）和倾斜入射，使得NA=0.33的EUV光刻系统中，水平向图形对入射光方向的变化非常敏感。高数值孔径EUV光刻机（参见6.7.2节）对入射光方向变化的敏感性更高。该系统中对入射光方向变化敏感性最高的是（4倍）垂向图形。硅片面尺寸相同的（4倍）垂向图形的掩模面尺寸小于（8倍）水平向图形的掩模面尺寸<sup>[29]</sup>。

大多数先进高数值孔径DUV光刻系统常采用强离轴照明或设置 $\sigma$ 值大于0.5。这些系统中光的衍射效率不具有平移不变性，不符合霍普金斯假设条件。在典型的EUV光刻系统中，掩模衍射光不具有平移不变性。所有EUV光刻系统和高数值孔径DUV光刻系统都需要采用严格建模，不能应用霍普金斯假设条件。需要在几个有代表性的人射角下计算掩模衍射光。采用霍普金斯方法计算每个人射角附近照明点对应的衍射光，称为局部霍普金斯方法。最终的像是这些像的非相干叠加。虽然在多人射角下进行严格EMF仿真增加了掩模与成像仿真的计算量，但对于高精度EUV光刻成像建模和高数值孔径DUV光刻成像建模来说，这么做是必须的<sup>[31]</sup>。

### 9.2.3 掩模引起的成像效应

首先，交替型相移掩模(AltPSM)<sup>[32]</sup>的成像光强不对称性证实了严格建模的重要性。AltPSM吸收层材料的刻蚀开口深度很大，使得掩模对形貌效应非常敏感。图9.2为AltPSM的近场仿真结果。在该仿真中，我们采用波导法结合矢量成像研究具有65nm密集线图形的AltPSM的成像性能。在本例及后续的成像示例中，掩模尺寸采用硅片面尺寸。同时，按照如下公式设定刻蚀相移层的深度，产生180°相移（与未刻蚀区域的透射光相比）：

$$d_{\text{etch}} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{quartz}} - 1)} \quad (9.16)$$

式中， $n_{\text{quartz}}$ 是石英基底的折射率； $\lambda$ 是波长。

图9.9左侧显示了仿真得到的空间像截面图。实线为相同宽度的空图形在刻蚀和未刻蚀条件下的像。与左侧未刻蚀条件下的像强度相比，右侧刻蚀产生的相移层边缘对光的散射降低了空间像的强度。未刻蚀掩模的成像强度更大，使得两个强度最大值之间的强度最小值向右侧偏移了12nm。

增加刻蚀相移层图形的宽度可以补偿AltPSM的成像强度不对称及其导致的放

置误差。图 9.9 左图中虚线为不同相移图形宽度  $w_{\text{shifter}}$  对应的空间像，相移图形宽度为 85nm 时，左右两个像的强度一致；右图显示了最小值位置与宽度的关系（仿真结果），宽度为 82.5nm 时，可将放置误差降低为零。

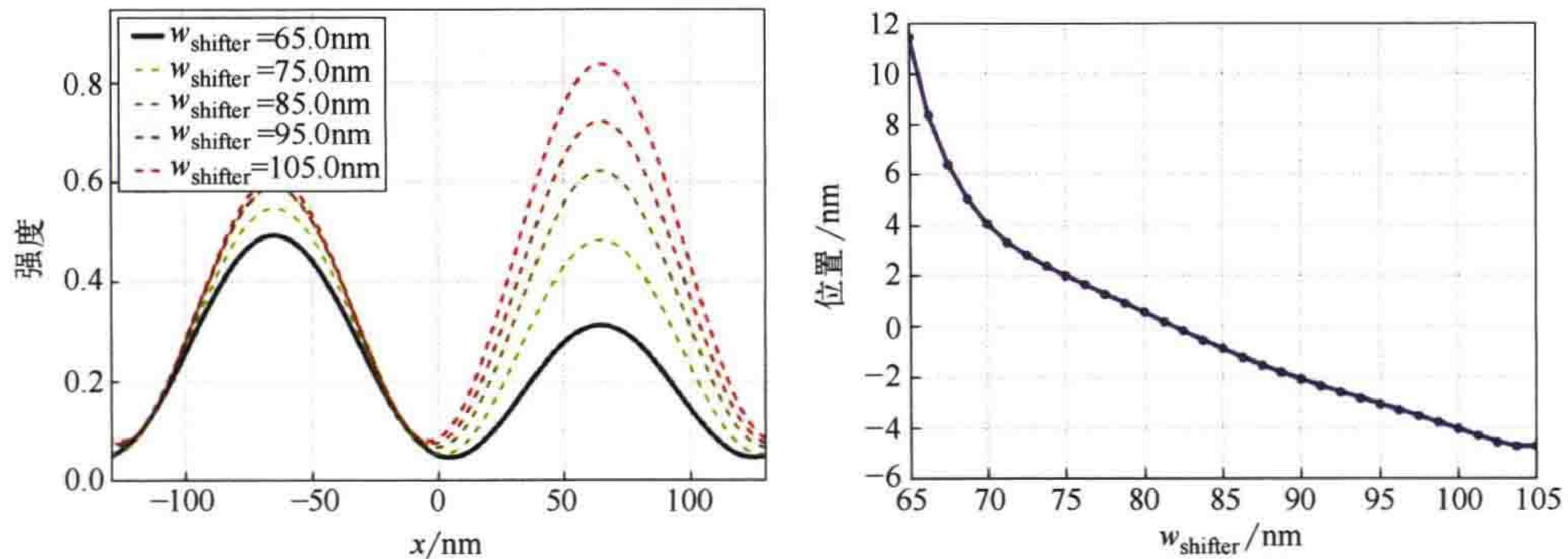


图 9.9 掩模形貌效应引起的像强度不对称。图形为 65nm 交替型相移掩模密集线。左图为不同相移层宽度  $w_{\text{shifter}}$  对应的像横截面图。右图为线的位置随着  $w_{\text{shifter}}$  变化的关系。成像条件： $\lambda=193\text{nm}$ ,  $y$  偏振圆形光源  $\sigma=0.3$ ,  $\text{NA}=1.2$ , 缩小倍率为 4, 离焦量为 0。Cr 吸收层的厚度为 80nm ( $n=0.842$ ,  $k=1.647$ )。基底为石英 ( $n_{\text{quartz}}=1.563$ ,  $k=0.0$ )。掩模结构见图 9.2

然而，这些仿真仅在单个焦面位置研究掩模形貌引起的成像不对称。系统的仿真和实验研究表明，与简单地增加刻蚀图形宽度的方法相比，利用欠刻蚀或预刻蚀等策略进行不对称补偿，在焦深方向的成像性能表现更优 [33]。

此外，微细图形的掩模衍射效应也会影响衰减型相移掩模和二元掩模的设计。图 9.10 为 50nm 线空图形的光学邻近效应曲线。掩模为 MoSi 型 AttPSM。仿真中没有应用辅助图形。利用简单的光刻胶阈值模型提取硅片面的 CD 数据。光刻胶位于折射率与之非常匹配的基底上。掩模线宽以及硅片面 CD 采用的都是硅片面尺寸。

图 9.10 的左侧显示了没有对掩模进行 OPC 时掩模线宽 (LW)、硅片面 CD 仿真值与图形周期之间的关系。基尔霍夫方法与严格掩模模型的仿真结果差异可达 5nm。右图显示了为获得 50nm 的目标 CD，在各种周期条件下计算得到的掩模线宽。很多其他仿真结果也都表明，OPC 模型必须考虑掩模形貌效应才能满足掩模设计的需要。

图 9.10 中的 OPC 没有添加辅助图形。辅助特征尺寸小于主图形。9.2.1 节讨论的掩模形貌效应与特征尺寸之间的关系表明，辅助图形的成像性能对掩模形貌效应更加敏感，如图 9.11 所示。图 9.11 为 MoSi 型 AttPSM 上孤立线图形的仿真空间像横截面图。为了比较不同节点光刻对应的仿真结果，使用阿贝 - 瑞利公式  $\text{NA}=0.3\lambda/\text{LW}$  对数值孔径进行缩放后再对孤立线进行成像仿真。阿贝 - 瑞利公式中，LW 表示硅片面特征尺寸或线宽。

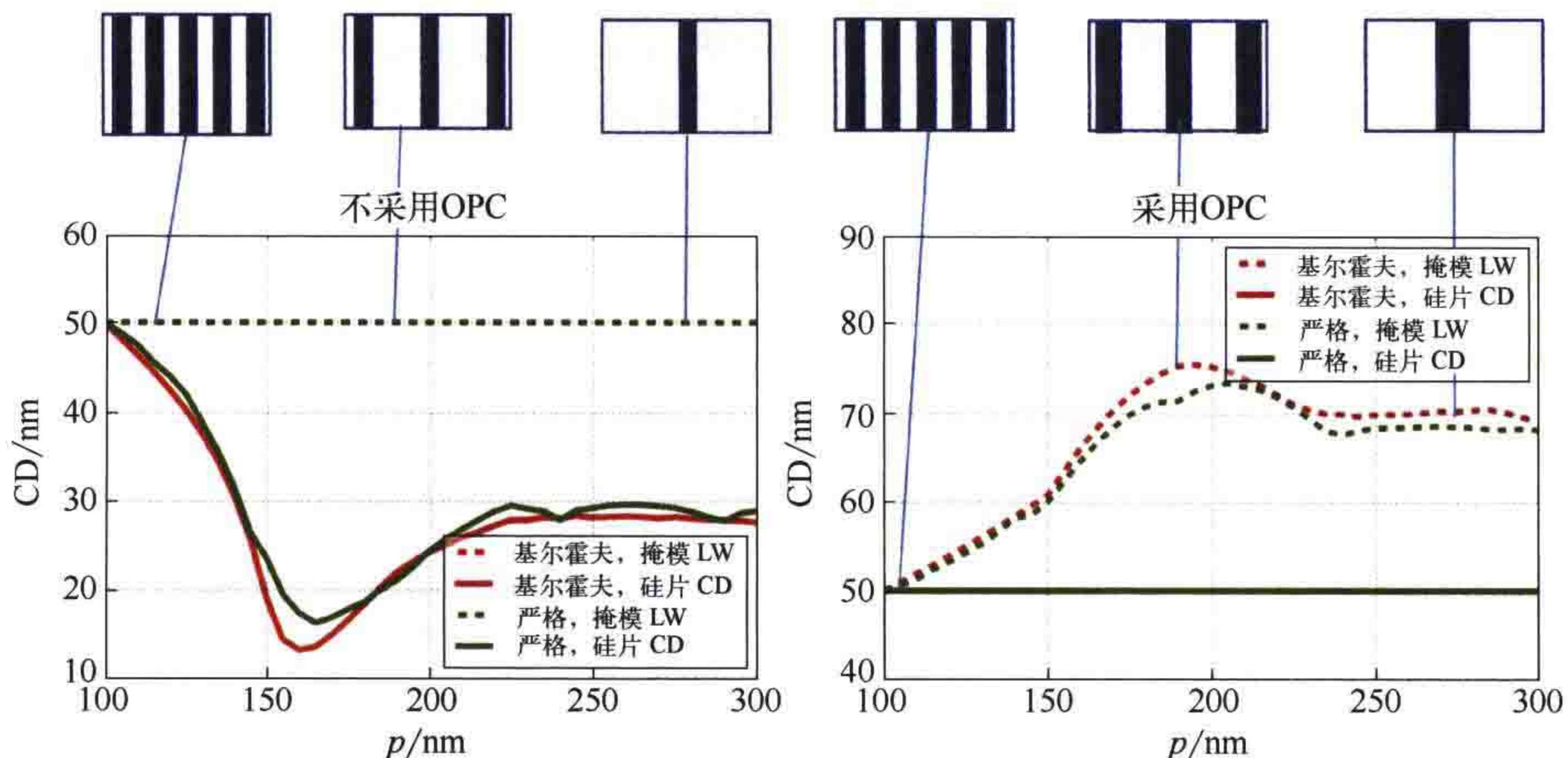


图 9.10 CD 和掩模线宽随着图形周期的变化曲线。图形为线空图形，掩模类型为 MoSi 型衰减相移掩模。左图没有进行 OPC，右图为 OPC 之后的结果。采用了基尔霍夫模型和严格掩模模型。成像条件： $\lambda=193\text{nm}$ ， $xy$  偏振 CQuad 光源  $\sigma$  为 0.5、0.9，极张角为  $20^\circ$ ， $\text{NA}=1.35$ ，缩小倍率为 4，离焦量为 0。MoSi 吸收层的厚度为  $68\text{nm}$  ( $n=2.343$ ,  $k=0.586$ )。基底为石英 ( $n_{\text{quartz}}=1.563$ ,  $k=0.0$ )。线宽为  $50\text{nm}$ ，没有添加辅助图形，CD 截取自光刻胶内空间像

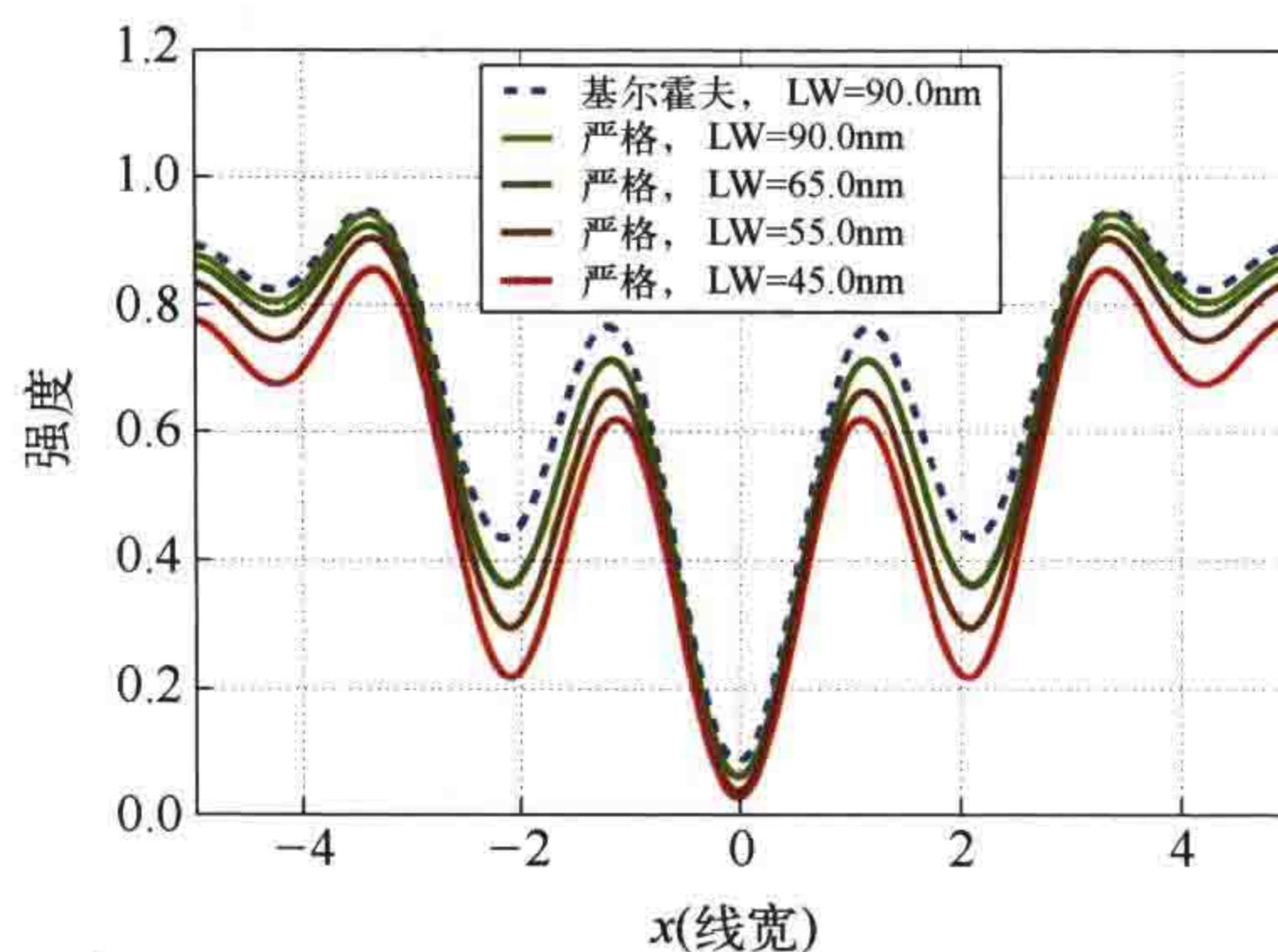


图 9.11 孤立线图形的仿真空间像横截面图。掩模为衰减型相移掩模，含辅助图形。采用基尔霍夫和严格掩模模型。 $y$  偏振二极照明， $\text{NA}=0.3\lambda/\text{LW}$ ，辅助图形的宽度为  $\text{LW}/3$ ，辅助图形的距离为  $2\text{LW}$ 。其他参数与图 9.10 相同

分别利用基尔霍夫模型和严格仿真方法对不透光辅助图形进行光散射仿真。严格仿真得到的辅助图形周围的光强最小值小于基尔霍夫模型的仿真结果。因此，确定 OPC 辅助图形的宽度时必须考虑这种影响。从观察到的结果看，这种影响与光的偏振和掩模极性密切相关。一般来说，基尔霍夫仿真方法不能充分预测不透光辅助图形的印出风险。对于透光辅助图形，TE 偏振光照明下仿真预测的印出风险过高。TM 偏振光照明下与 TE 偏振光照明下的结果相反。

如 9.2.1 节所述，掩模形貌效应不仅影响衍射光的振幅，还影响衍射光的相位。这些相位效应会导致工艺窗口不对称、与周期和方向有关的最佳焦面偏移等类似像

差的成像现象<sup>[27, 34, 35]</sup>。图9.12展示了其中的一些效应，分别为不同掩模材料对应的工艺窗口和不同周期的最佳焦面分析结果。不透明MoSi-玻璃掩模(OMOG)<sup>[36]</sup>和传统MoSi掩模的工艺窗口均关于离焦量为零的标称像面不对称。对最佳焦面位置的分析表明，最佳焦面位置随着周期的变化而变化。这类似于投影物镜的球差引起的成像现象（详见8.1.6节）。

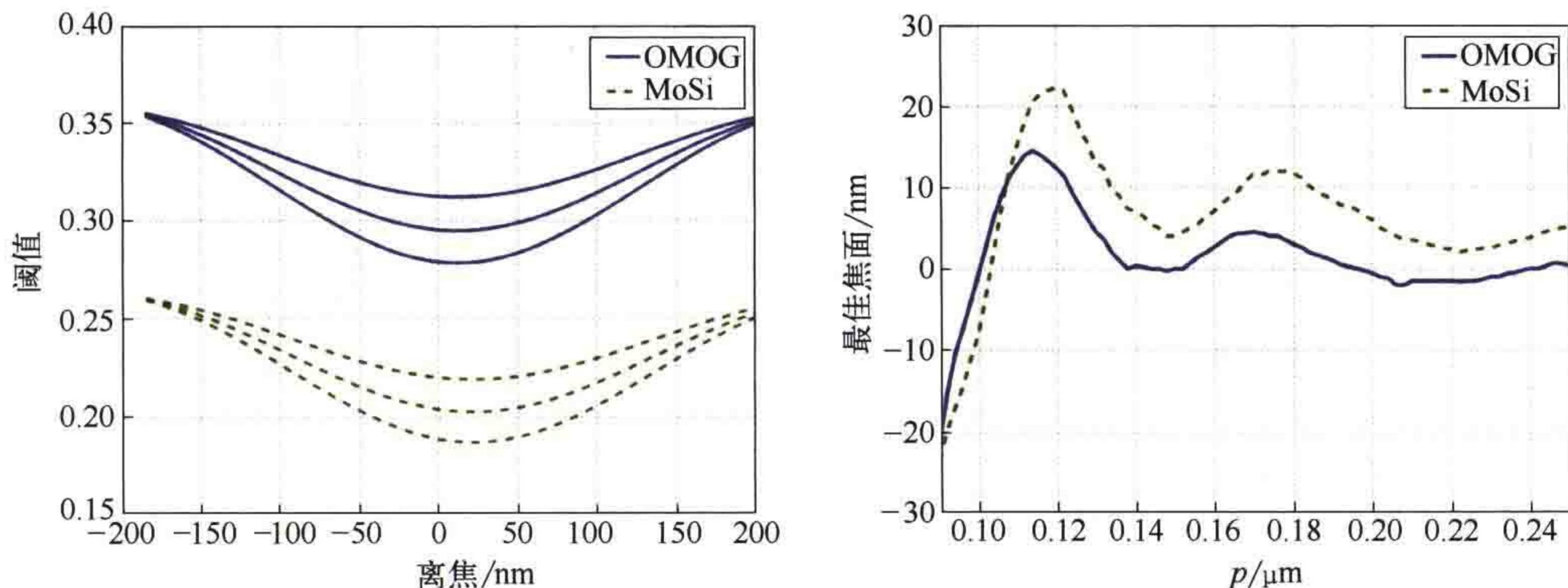


图9.12 掩模导致的最佳焦面偏移。掩模为MoSi型和OMOG型掩模，45nm线图形。

左图为周期120nm时的工艺窗口。右图为最佳焦面随周期的变化图。成像条件： $\lambda=193\text{nm}$ ， $xy$ 偏振CQuad光源 $\sigma$ 为0.66、0.82，极张角为 $60^\circ$ ， $\text{NA}=1.35$ ，缩放倍率为4。MoSi吸收层的厚度为68nm ( $n=2.343$ ,  $k=0.586$ )。OMOG吸收层为双层结构，底层厚度为43nm,  $n=1.239$ ,  $k=2.249$ ，顶层厚度为4nm,  $n=2.2235$ ,  $k=0.8672$ 。石英基底 ( $n_{\text{quartz}}=1.563$ ,  $k=0.0$ )

图9.12等例子表明，先进光学光刻掩模的三维形貌会产生相位效应，对成像的影响与像差类似。所以有可能将掩模引起的像差现象当作投影物镜的波像差。由于像差测量技术常利用专门设计的检测掩模，通过对该掩模多焦面位置的像进行分析来测量波像差，所以在应用像差测量技术时，也需要考虑这些效应<sup>[37-39]</sup>。

通过控制投影物镜波前、改进掩模吸收层材料的方法可补偿掩模引起的像差效应<sup>[40-42]</sup>。参考文献[35]中详细讨论了投影物镜像差和掩模引起的像差之间的关系，其中介绍了基于衍射谱严格仿真的泽尼克分析方法。该方法可以作为量化掩模效应的有效方法。

图9.13展示了基尔霍夫和严格掩模仿真方法对缺陷可印性仿真预测结果的差异。20nm方形暗场缺陷位于两45nm线条之间。缺陷可能是在掩模制造过程中产生的，也可能是使用过程中落到掩模上的。图示为利用几个大小略有差异的阈值截取掩模版表面的像得到的轮廓图。从基尔霍夫方法的仿真结果中可以看到，缺陷使得线条之间的空间变窄，不能充分预测缺陷带来的影响。严格仿真预测出了两根线条之间的桥连，特别是在光强略低于目标尺寸阈值时。

缺陷可印性的预测结果对模型的假设条件高度敏感。缺陷是光刻掩模上最小的

图形，所以它们对掩模的形貌效应十分敏感。通常，基尔霍夫方法仿真预测的暗场缺陷可印性低于实际，仿真预测的亮场缺陷的可印性高于实际。交替性相移掩模上的相位缺陷可以会聚或者散射来自其附近的光。它们被印出的风险随焦面位置的变化呈现出不对称波动<sup>[43]</sup>。

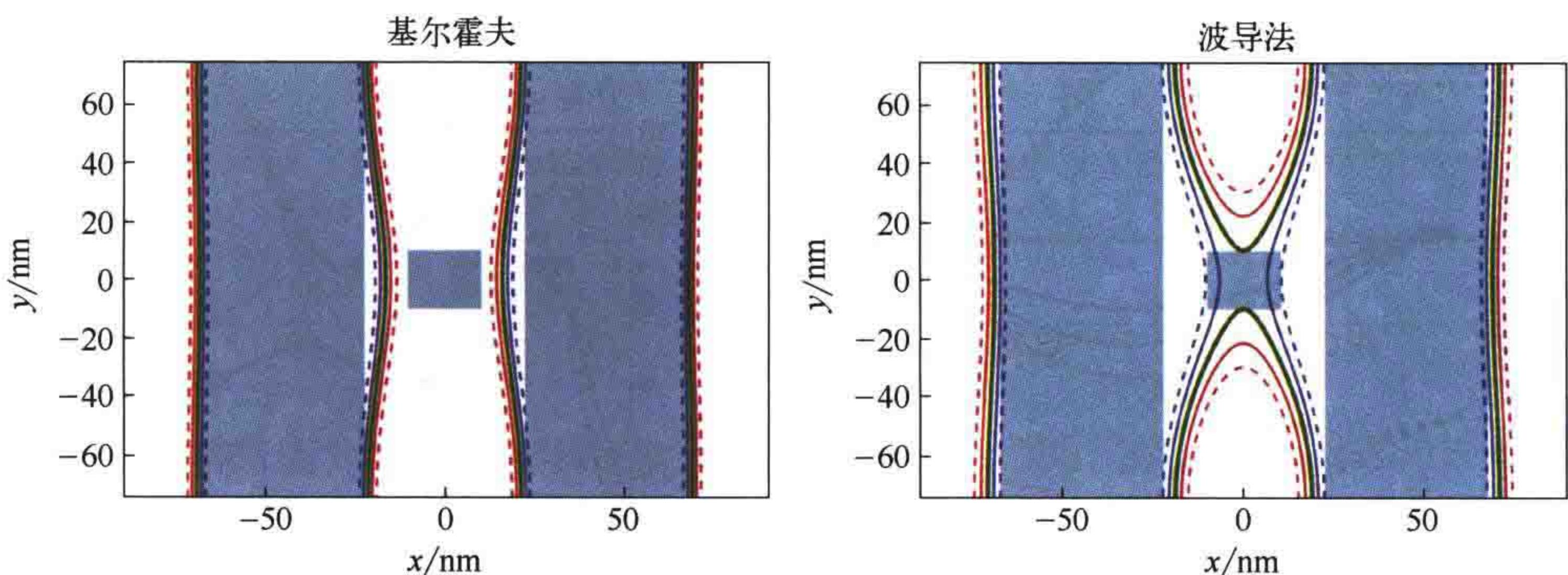


图 9.13 基尔霍夫模型和严格掩模模型的缺陷可印性仿真结果。填充区域为掩模版图：CD 为 45nm、周期为 90nm 的密集线图形。缺陷位于两条线之间，大小为 20nm，方形。MoSi 参数同图 9.12。实线和虚线分别为采用图形的阈值截取的像轮廓图。光学参数设置： $\lambda=193\text{nm}$ , xy 偏振 CQuad 光源  $\sigma$  为 0.7、0.9，极张角为  $60^\circ$ ，NA=1.35，缩小倍率为 4

## 9.2.4 EUV 光刻中的掩模形貌效应与缓解策略

上一节举例说明了严格掩模建模对 DUV 光刻的重要性。掩模形貌效应的幅度通常随（掩模面）特征尺寸和所用波长之间比例的减小而增加。EUV 光的波长短，增大了掩模上特征尺寸与波长之间的比例。这是否意味着 EUV 光刻对掩模形貌效应的敏感度更低呢？

显然不是。掩模形貌效应重要程度的第二个影响因素是图形的厚度或高度。EUV 吸收层材料的厚度与光学光刻掩模吸收层材料的厚度基本一致。EUV 光刻掩模吸收层厚度大约为波长的 4 到 5 倍。吸收层材料厚度与波长之间的比例很大，使得 EUV 光刻对掩模形貌效应非常敏感。EUV 掩模的特殊几何结构及其在成像系统中的集成方式使得 EUV 光刻产生了几种特有的形貌效应。

图 9.14 对比了反射式 EUV 光刻掩模和透射式 DUV 光刻掩模。与 DUV 光刻相比，在 EUV 光刻波段，光学材料性质（折射率  $n$  和消光系数  $k$ ）的变化要小得多。因此，为了获得所需的强度和相位调制，需要增加吸收层厚度。

EUV 光刻吸收层图形的相对厚度（由波长归一化）远大于 DUV 光刻。由于光两次通过吸收层，EUV 掩模吸收层的厚度变得更加重要。首先，照明系统发出的光照射到掩模时第一次穿过吸收层材料；然后经多层膜反射后再次穿过吸收层。

EUV 掩模多层膜白板引入了 EUV 光刻特有的掩模效应。光的反射不是发生在

多层膜顶部，而是在多层内部的几个界面，这增加了掩模的有效厚度。倾斜照明、多层膜反射率对入射光角度的依赖性以及（厚）吸收层材料对光的两次衍射使得 EUV 光刻的斜入射效应变得更加重要（参见 9.2.2 节）。

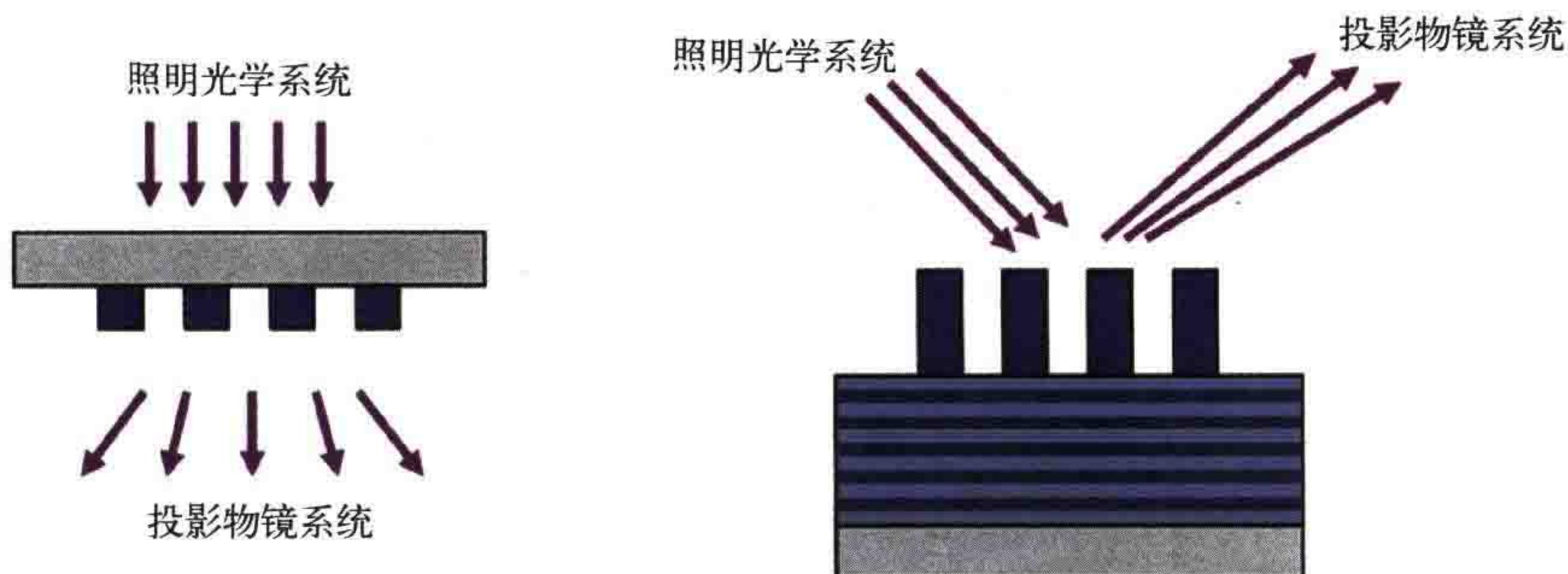


图 9.14 DUV 光刻的透射式掩模 (左) 与 EUV 光刻的反射式掩模 (右) 原理图。EUV 掩模的多层膜仅是示意图。实际的 Mo/Si 多层膜白板由 40 对 Mo/Si 膜组成。转载自参考文献 [44]

光的衍射与掩模上入射光的方向密切相关，对成像有重要影响。图 9.15 显示了二极照明条件下， $NA=0.33$  的 EUV 成像系统对 16nm 密集线在不同焦面的成像结果。图中为采用单极照明和两极同时照明情况下的像。

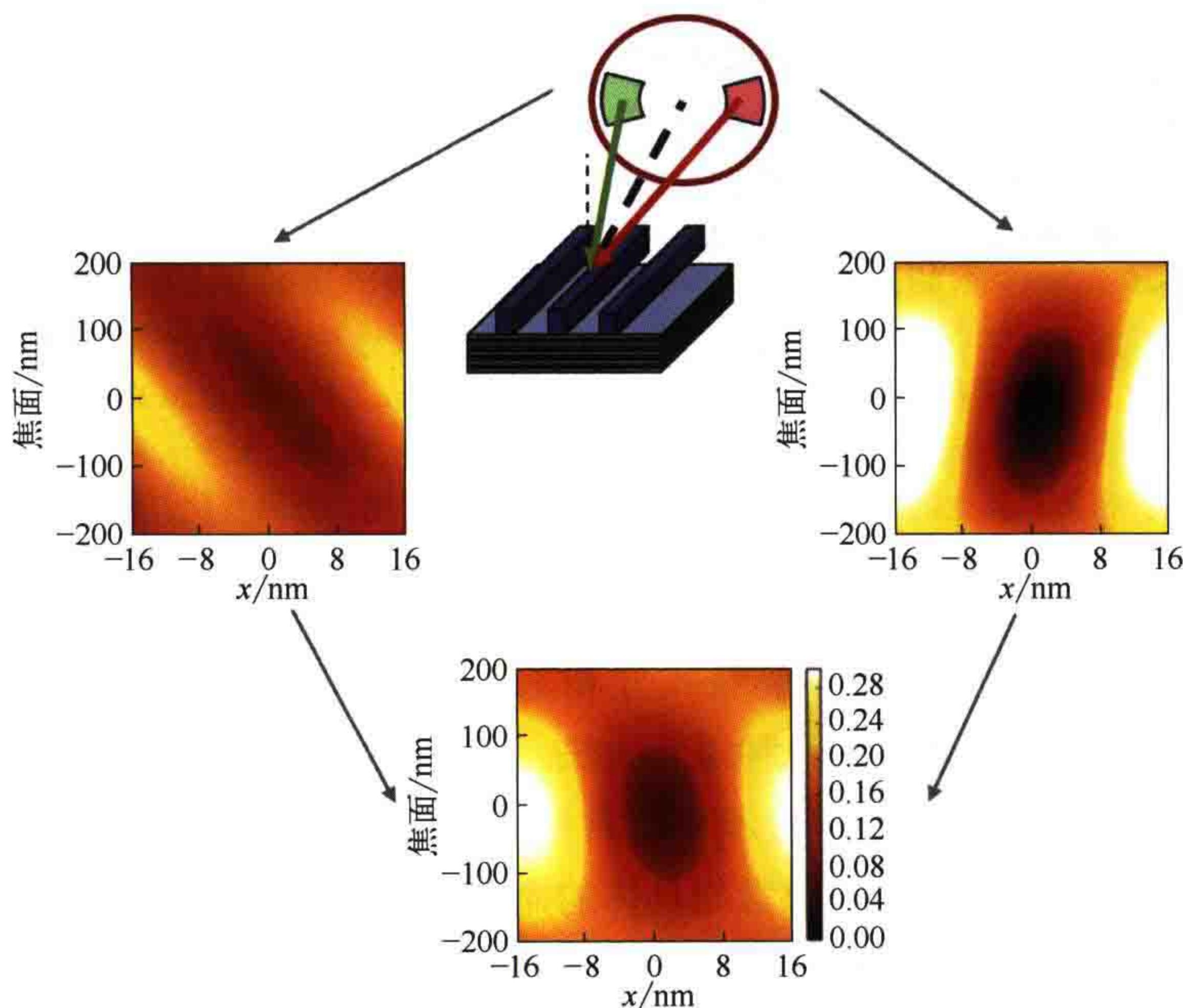


图 9.15 二极照明条件下对 16nm 水平密集线图形的焦深方向成像仿真结果。上中图为掩模结构和照明方向示意图。细虚线和粗虚线分别表示掩模表面法线方向和主光线入射角。圆以及里面的扇形区域分别表示 0.33 的数值孔径以及左右两极在照明光瞳的位置。分别绘制了左极、右极以及左右两极对应的空间像强度关于焦面的图。成像条件设置：CRAO=6°，二极照明  $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.4/0.8$ ，极张角为 30°，非偏振光。改编自参考文献 [44]

由于照明方向不同，两个单极照明条件下的（多焦面）成像差别很大。由于衍射效率随照明方向的变化而变化，两个单极照明条件下不仅远心性相反（图形位置与离焦面的关系），而且对比度和平均强度也不同。在其他周期和成像条件下，也可以观察到类似的现象<sup>[29, 45]</sup>。将 EUV 照明光瞳的几个分区（不同的）所成像进行叠加通常会降低成像对比度<sup>[46, 47]</sup>。掩模形貌效应与照明几何形状的强耦合性使得光源掩模优化（SMO）对 EUV 光刻来说更加重要。参考文献 [48, 49] 介绍了 EUV 光刻 SMO 面临的最大挑战和可能的解决方案。

图 9.16 所示为另一种掩模形貌效应，左图为 EUV 吸收层导致的波前变形。前面已经介绍并讨论了反射近场的相位形变，如图 6.9 所示。图 9.16 右侧为（归一化的）对比度与仿真空间像焦面位置之间的关系，由图可知，当与周期有关的最佳焦面偏移量为 20nm 时对比度最高。在 DUV 光刻中也可以观察到类似的效果<sup>[50]</sup>。由于焦深减小，这种效应对 EUV 光刻的影响更为明显。

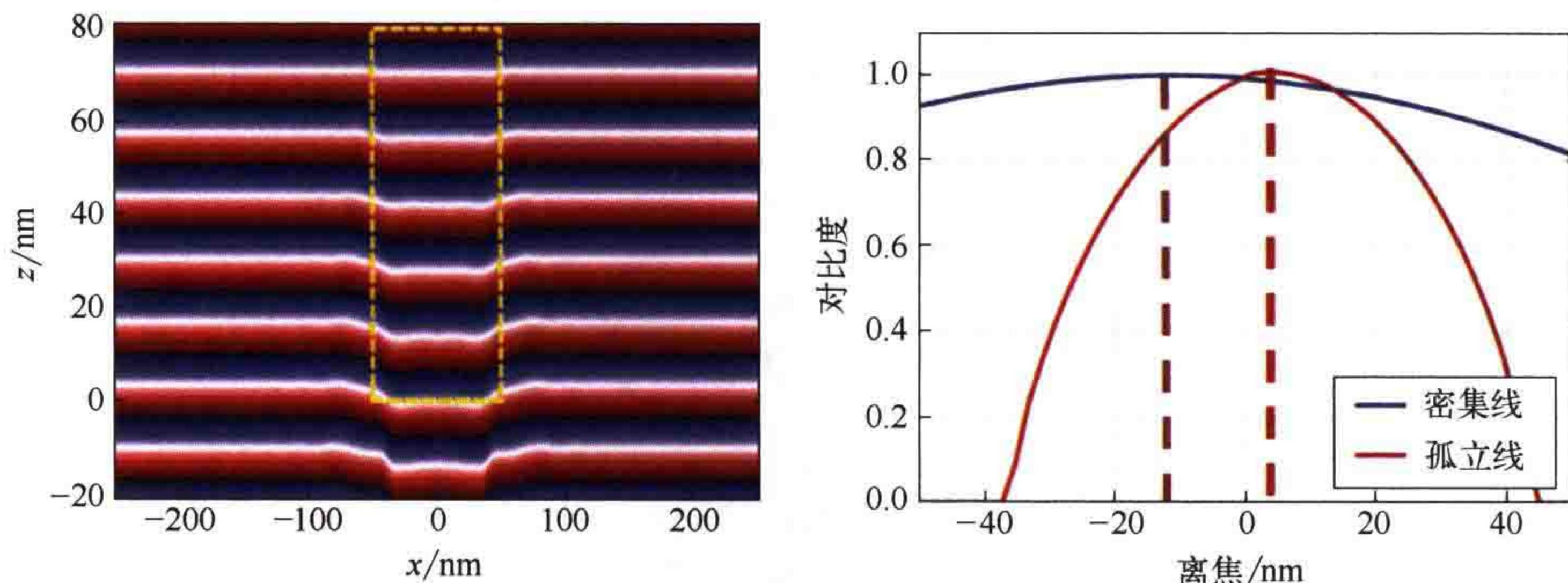


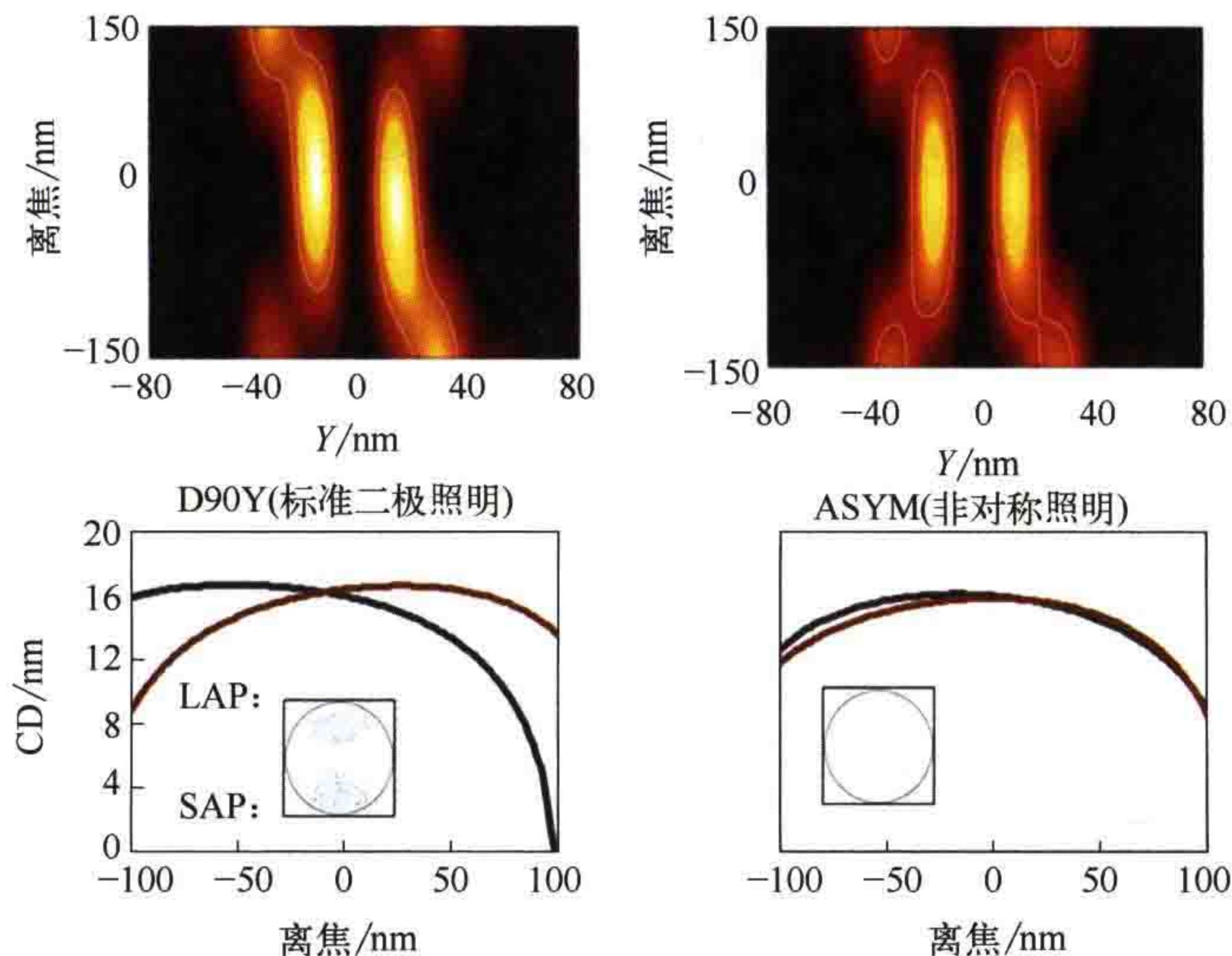
图 9.16 EUV 光刻的最佳焦面偏移效应。左图：波前在 88nm（掩模面）TaBN 吸收层中传播的近场仿真结果；系统位于真空中，掩模为反射式多层膜；虚线矩形表示吸收层的轮廓。

右图：密集和孤立图形的归一化局部对比度（NILS）随焦面的变化。掩模面特征尺寸为 88nm，二极照明  $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.4/0.8$ ，极张角为 30°。改编自参考文献 [44]

进一步减小 EUV 光刻中的特征尺寸和工艺因子  $k_1$ ，需要缓解掩模形貌效应带来的不利影响。人们已研发了几种缓解方法。这里给出了三个例子。前两种方法通过对照明形状或者掩模版图进行不对称性修正提高 EUV 掩模吸收层的成像性能。这些方法虽然很容易实现，但常常与具体的掩模版图密切相关，通用性较差。虽然第三个例子中的新型吸收层材料对掩模结构影响很大，但是这些新材料可从根本上解决掩模形貌效应问题，可作为更通用的解决方案。

如图 9.17 所示，客户化照明形状可减弱两个相邻空图形在焦深方向的成像不对称性<sup>[51]</sup>。如左图所示，二极对称照明条件下空间像和 CD 仿真值在焦深方向明显不对称。利用优化后的不对称客户化照明（右图所示）可以完全补偿掉这些不对称

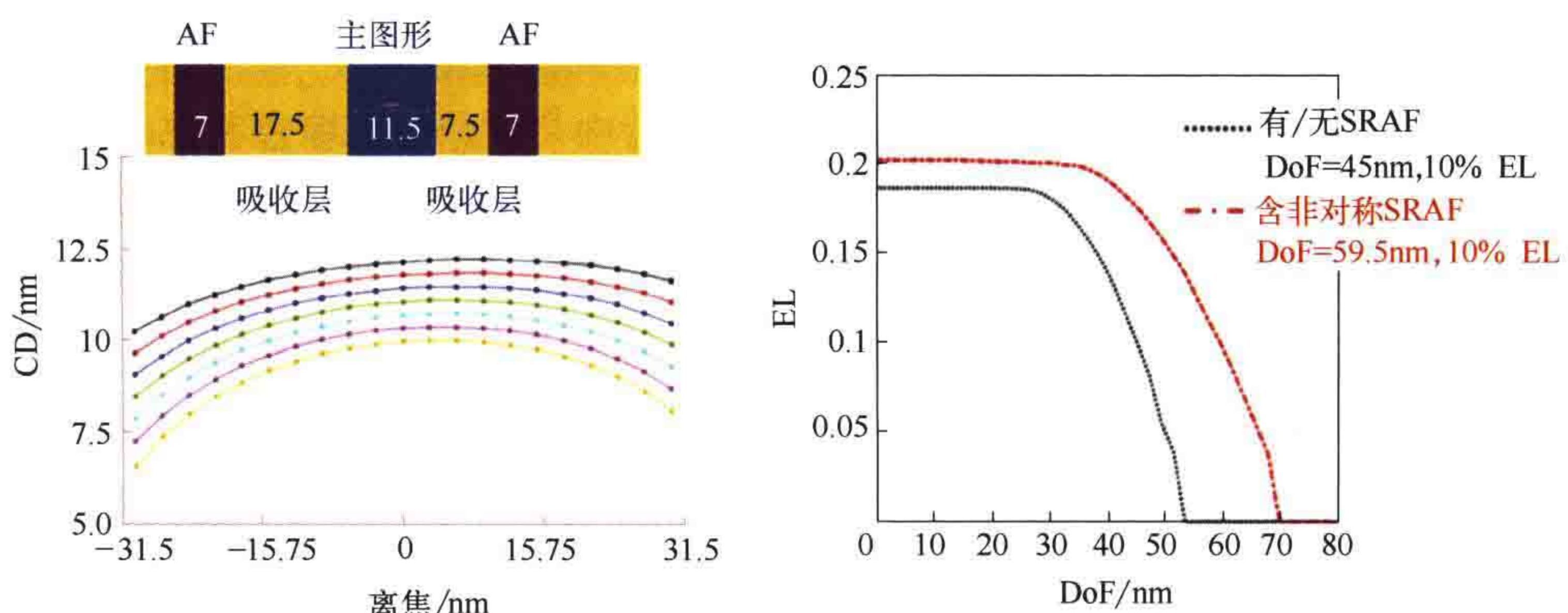
性。进行光源优化时必须特别注意，需要在保持高成像对比度的同时避免产生异常的像灵敏度。



**图 9.17** 标准二极照明（左图）与优化的非对称照明（右图）条件下，水平双缝图形的成像仿真结果。第一行：横坐标为焦面的空间像强度图。第二行：顶部狭缝（Y的正向）以及底部狭缝（Y的负向）的特征尺寸或者 CD，横坐标为焦面。红线和黑线分别对应左右狭缝。照明形状如第二行图中的内嵌图所示。LAP 表示大角度极，SAP 表示小角度极。

改编自参考文献 [51]

应用不对称辅助图形也可以减弱 EUV 光刻成像对比度的衰减。Stephen Hsu 和 Jingjing Liu 对不对称放大倍率高数值孔径 EUV 成像系统进行了仿真<sup>[52]</sup>，如图 9.18 所示，验证了这一点。



**图 9.18** 非对称辅助图形（AF）对工艺性能提升的仿真结果。左图：采用了非对称辅助图形的 11nm 线宽、70nm 周期的线空图形，以及相应的 Bossung 曲线。右图：不含 SRAF 以及包含优化后 SRAF 情况下的曝光裕度（EL）- 焦深（DoF）图。改编自参考文献 [52]

不对称辅助图形有助于改善不同方向入射光对应衍射级的对称性。需要特别注意的是，需要保证辅助图形在焦深方向的有效性，并防止辅助图形在有用焦深范围内被印出。参考文献 [52] 详细介绍了 EUV 光刻不对称辅助图形及其对工艺性能的影响。替换掩模材料是解决掩模形貌效应问题的最常用方法。利用高  $k$  材料可以减小吸收层的厚度。折射率接近 1 的吸收层材料导致的波前和光的相位变化更小。图 9.19 中的近场图验证了这一结论。

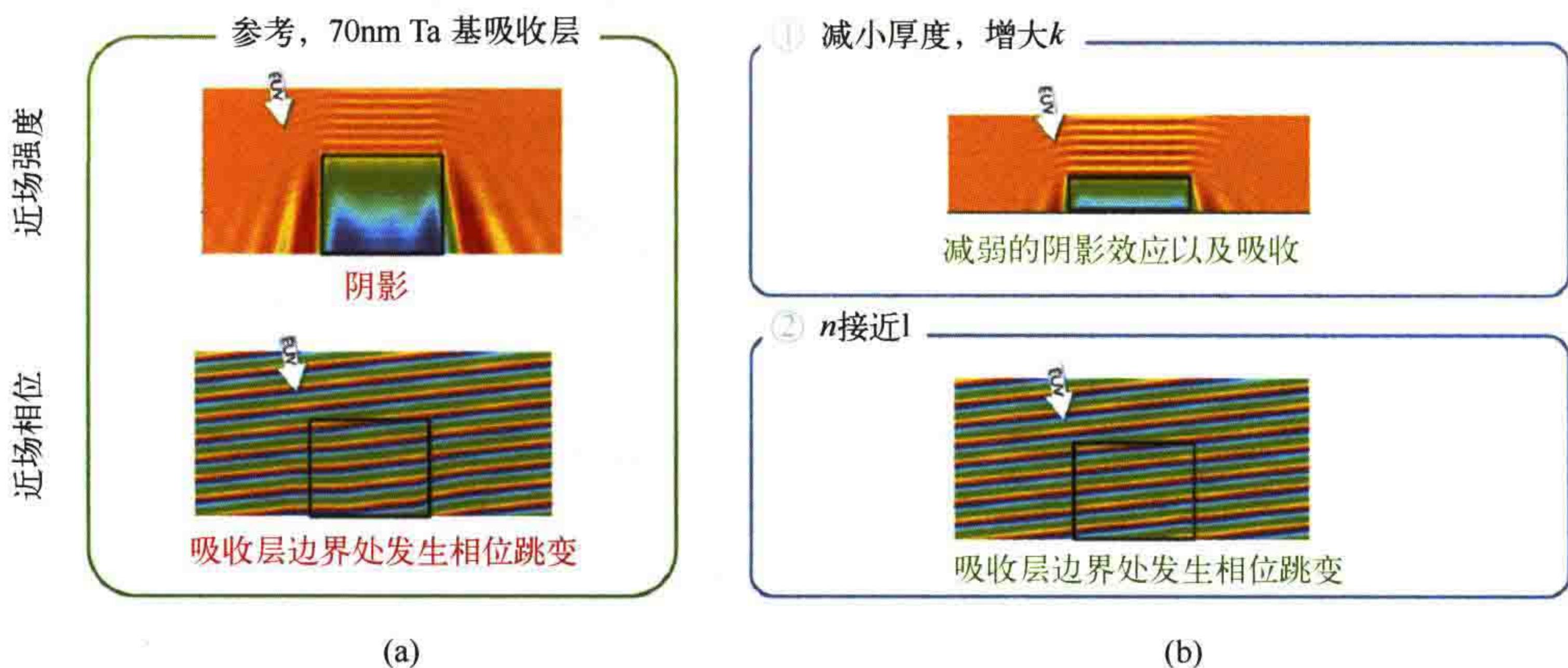


图 9.19 (a) 70nm 厚 Ta 材料参考吸收层的近场 (上) 和相位 (下) 仿真结果。  
 (b) 减小吸收层厚度并增大消光系数后的近场强度 (上) 与 70nm 厚、  
 消光系数为 1 的吸收层近场相位 (下)。箭头表示 EUV 光的入射方向，  
 黑色框表示吸收层的位置。转载自参考文献 [53]

另一方面，消光系数更低、折射率为  $0.88 \sim 0.95$  的吸收层材料可用于制造 EUV 光刻 AttPSM<sup>[54]</sup>。折射率低的吸收层材料也有利于光在无吸收层区域的传播（折射角小），并减小不同照明条件下所成像之间的位置偏差<sup>[45]</sup>。

掩模吸收层材料和结构方面的研究仍在进行中<sup>[55-57]</sup>。需要综合考虑不同的成像指标（如 NILS、目标尺寸阈值、非远心度等）才能确定最佳材料和结构，而且这些材料还需要满足掩模刻写、寿命、检测、修复等方面的需求。初步实验研究表明，采用高  $k$  吸收层材料可以提高 EUV 光刻机的套刻精度<sup>[58]</sup>。除此之外，还必须考虑多层膜的特性<sup>[59]</sup>。

## 9.2.5 三维掩模模型

应用于大面积版图仿真时，严格掩模仿真需要大量的计算资源。利用并行算法<sup>[60, 61]</sup>和专用硬件<sup>[62, 63]</sup>可以一定程度上解决该问题。另一方面，应用于光刻成像计算的掩模衍射场建模有一定特殊性，允许模型存在合理的精度损失。例如，由于

投影系统的数值孔径大小有限，掩模衍射谱的高空间频率成分对远场像没有作用。所以可以容忍这些高空间频率成分的数值计算误差。而且，掩模图形大多是层次结构的，边通常沿着设计偏好的方向。可以利用这些信息建立更有效的模型，描述掩模形貌效应的影响。

掩模分解技术将大面积、三维问题拆分成简单的小面积或者二维 / 一维问题。Kostas Adam 和 Andrew Neureuther 提出了一种结合了时域有限差分 (FDTD) 法的域分解技术 (DDT)。DDT 使用 FDTD 计算掩模孤立边对光的衍射。之后，将特征衍射图形应用于版图中的所有边。当掩模图形的边距离不是很近时，这种方法很准确。该模型还可以应用于拐角衍射效应仿真或者不同入射角情况下的衍射仿真。专门开发了适用于波导法的掩模分解技术。这种方法将三维问题拆分成几个二维问题，例如将接触孔阵列或者更复杂版图对光的衍射拆分为线空图形对光的衍射问题。

其他简化程度更高的模型尝试在不解麦克斯韦方程组的情况下描述掩模形貌效应。这些紧凑模型通过修正基尔霍夫掩模模型或者成像系统来仿真掩模形貌效应。边界层模型在基尔霍夫掩模图形边缘增加半透明薄层。利用严格掩模模型进行校准，确定出薄层的宽度，透射率和相位。边界脉冲模型也采用类似的方法，将具有一定强度和相位的点脉冲添加到基尔霍夫掩模模型的所有边上。这种模型已经用于光学和 EUV 掩模仿真。

掩模形貌效应会引起与偏振密切相关的振幅和相位效应。这种效应可以通过修改投影物镜光瞳函数来近似地仿真。在投影物镜的琼斯光瞳中引入复杂的光瞳滤波器。采用泽尼克或切比雪夫多项式描述这些光瞳滤波器的形状，采用严格掩模和成像仿真进行标定。这些多项式也可以直接用于描述掩模的衍射谱。也可以利用神经网络仿真掩模形貌效应引起的衍射谱变化，这种方法更加灵活。利用测试图形对神经网络进行训练，可高精度地仿真出各种掩模形貌效应。

上述紧凑型掩模模型都必须采用完全严格的 EMF 仿真进行校准。模型的精度、性能、灵活性和可扩展性取决于掩模类型、成像条件和具体的应用场景。

图 9.20 给出了掩模模型的分类，从薄掩模或者基尔霍夫模型到完全严格的模型（不采用霍普金斯假设条件）。与基尔霍夫模型相比，紧凑型模型提高了仿真准确性，但需要利用严格模型进行校准。利用分解技术严格仿真可应用于更大掩模区域的仿真。模型的精确性和计算量从左到右递增。需要根据具体的应用场景选择最佳模型。将不同模型组合使用，便于在光学邻近效应修正和光源掩模优化中考虑掩模形貌效应。

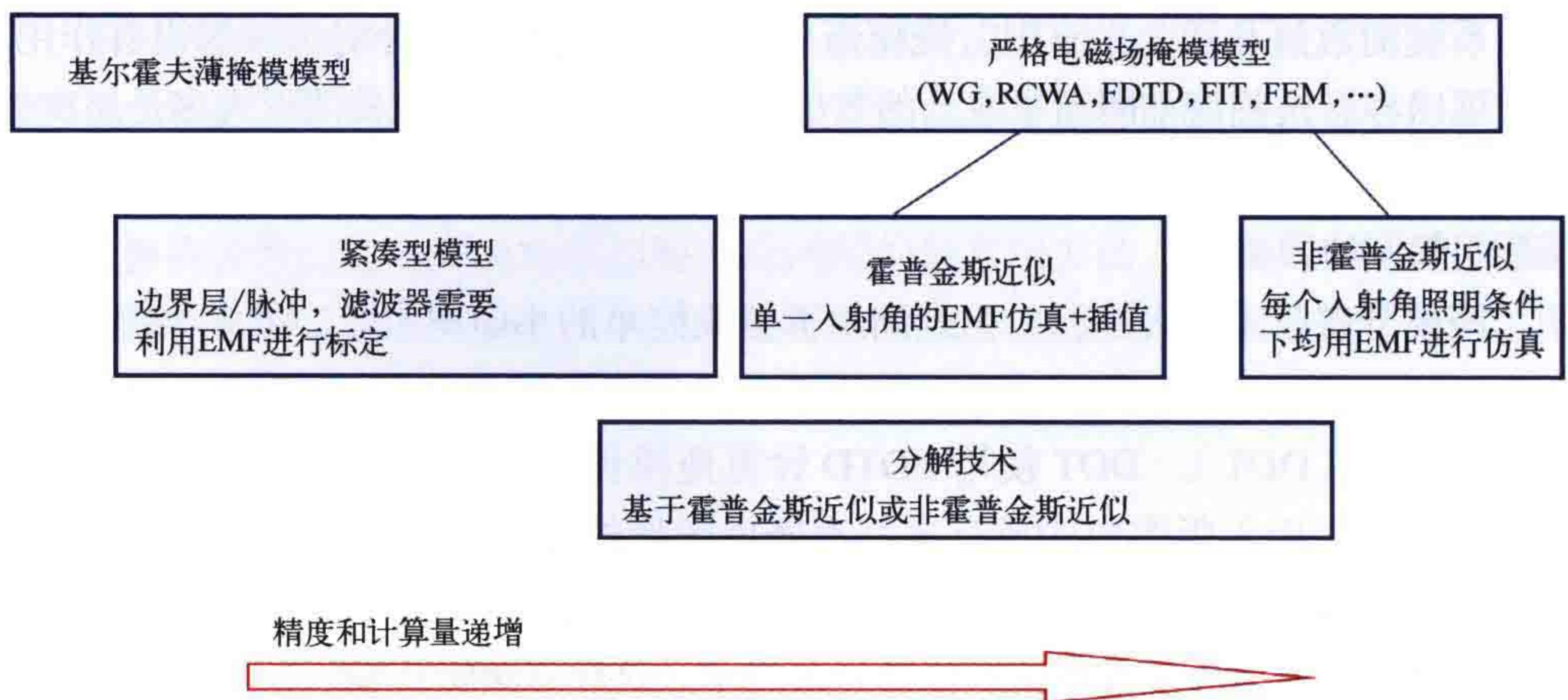


图 9.20 掩模模型分类

### 9.3 硅片形貌效应

20世纪80年代后期第一次详细研究了非平面基底上的光刻曝光。Matsuzawa等人<sup>[72]</sup>利用有限元法研究硅片基底上台阶图形的光散射，证明了散射光会引起局部曝光剂量以及光刻胶形貌的变化。除有限元法外，还采用其他方法对这种反光槽进行了研究。尽管早期已有一些关于硅片形貌对光刻工艺影响的研究，但是当时严格电磁场仿真模型在硅片面散射效应研究中的应用还比较少见。

通常，化学机械抛光（CMP）可以一定程度上调节硅片的平整度，底部抗反射涂层（BARC）可抑制硅片上图形对光的反射。利用这两种技术可提高焦面和工艺控制能力。如 3.2.2 节所述，BARC 改善了光刻胶形貌的形状，降低了 CD 对光刻胶厚度波动的敏感度。此外，他们还可减少光向硅片表面介质不均匀区域的传播。降低了硅片表面介质不均匀导致的光衍射对成像的负面影响。基于这种结论，可以利用解析的薄膜传递矩阵来描述光刻胶内部的强度分布。FinFET（鳍式场效应晶体管）等新器件结构以及双重图形技术等新工艺的应用，使得硅片形貌效应变得更加重要。

相比于掩模形貌效应的严格建模，硅片散射效应的严格电磁场建模更具挑战性。由于步进扫描光刻机采用了缩小倍率，硅片面形貌效应建模需要仿真的区域小于掩模上的面积。但是，硅片面入射光的角度和部分相干效应更大，增加了硅片形貌效应仿真的计算量。需要计算、存储并叠加多个光源点对应的散射场。此外，采用严格模型仿真硅片面散射效应时，对电磁场的高空间频率分量的数值误差更为敏感。投影物镜有限的数值孔径和相应的带通滤波效应减小了这种误差对掩模形貌效应仿真影响。但是硅片形貌效应与掩模形貌效应不同，电场里所有空间频率分量都会影响光刻胶内部的强度分布。

本节重点介绍由硅片面散射现象导致的几个重要光刻效应。这些效应无法用薄膜传递矩阵法进行研究。这方面的研究工作包括不同 BARC 沉积策略之间的比较研究、多晶硅线附近光刻胶底部残留效应研究，以及双重图形技术中硅片形貌效应引起的线宽变化研究。

### 9.3.1 底部抗反射涂层的沉积策略

第一个示例为 45nm 密集线图形的光刻曝光和光刻胶工艺结果。密集线图形与硅片上 10nm 高、150nm 宽的硅台阶图形交叉。曝光参数和硅片膜层参数见图 9.21 的标题。图中最上面一行显示了用平面化沉积工艺（左）和保形沉积工艺（右）进行底部抗反射涂层（BARC）沉积得到的两种不同的硅片几何形状。图 9.21 中间一行显示了硅片膜层内过中心点的光强横截面图。虚线表示 BARC 的顶部轮廓。最下面一行为计算出的光刻胶轮廓。

平面化沉积工艺产生的 BARC/ 光刻胶界面为一个平面。仅硅基底台阶图形顶部对应的 BARC 厚度为最佳值。没有在该台阶顶部中心位置上方的光刻胶中观察到驻波。台阶两边的 BARC 太厚，反射光导致了明显的驻波图形。台阶两侧 BARC 的抗反射表现也欠佳，可以观察到明显的驻波和底部光刻胶残留。

保形沉积工艺沉积的 BARC 厚度均匀。在相应强度分布中几乎都没有驻波。但是硅或者 BARC 形成的台阶对光的散射降低了台阶两侧光刻胶 /BARC 界面周围的光强，导致了相应区域光刻胶线条的线宽波动以及光刻胶残留。

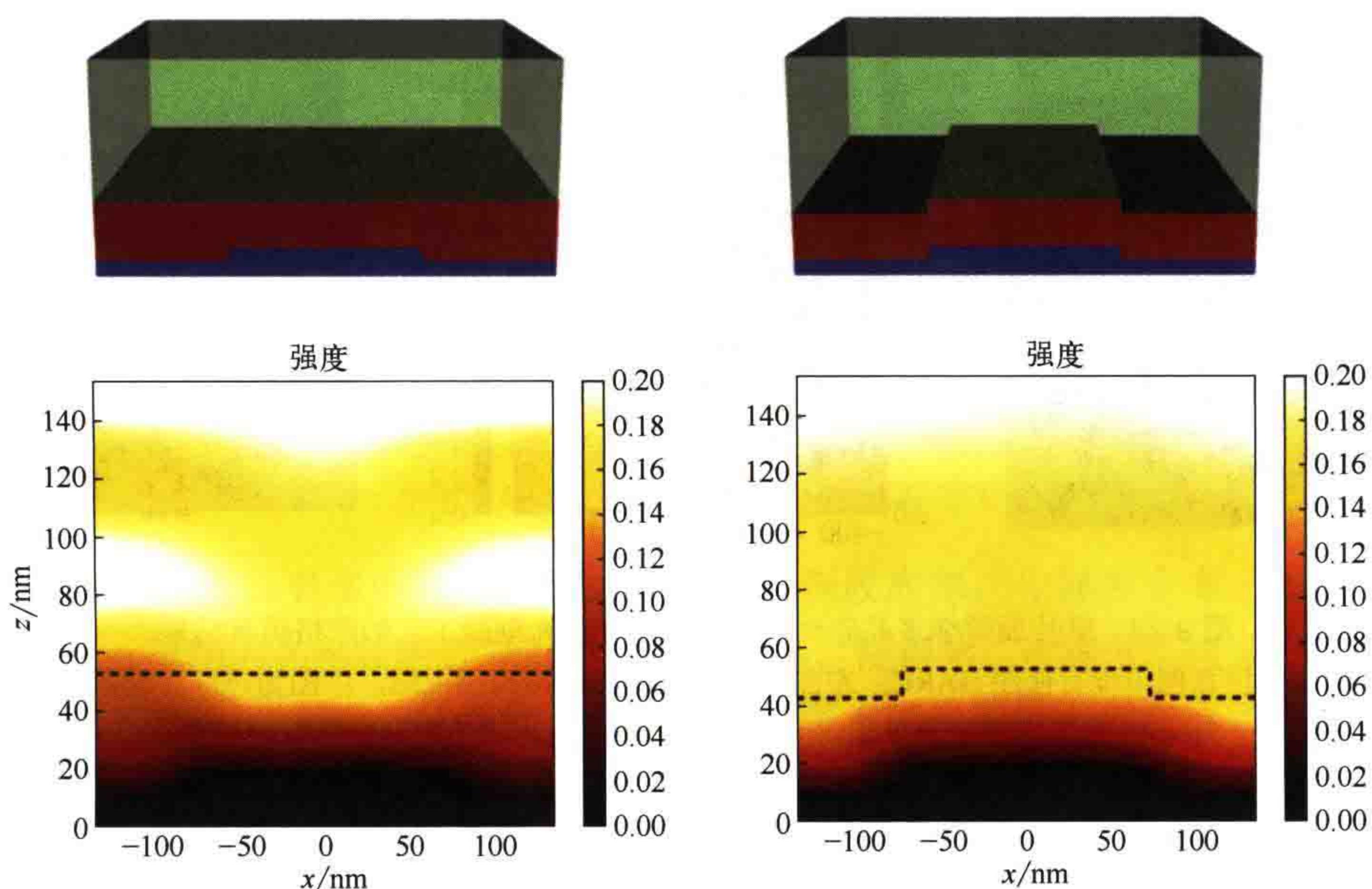


图 9.21

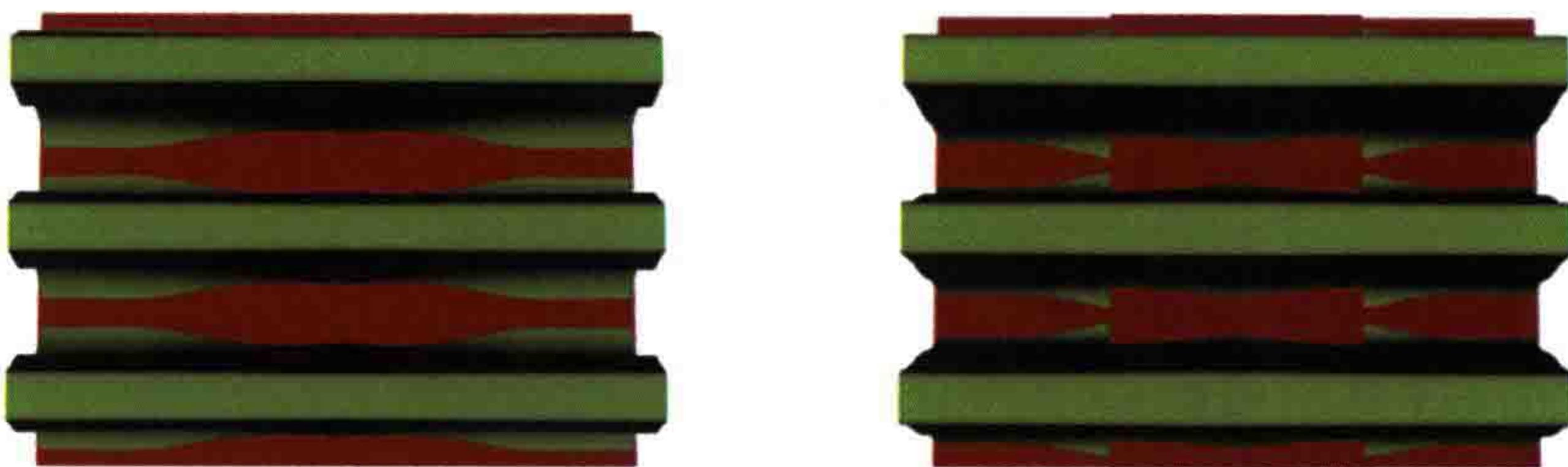


图 9.21 45nm 密集线图形的光刻曝光和光刻胶工艺严格仿真结果。左侧为平面化 BARC 沉积工艺，右侧为保形沉积工艺。第一行：硅片膜层的侧视图。第二行：过空图形中心的膜层内光强分布横截面图。第三行：光刻工艺处理后光刻胶形貌的俯视图。曝光参数： $\lambda=193\text{nm}$ ，偏振二极照明： $\sigma$  为 0.76、0.89，极张角  $35^\circ$ ， $\text{NA}=1.25$ 。硅片膜层：中间的硅台阶，高 10nm，宽 150nm，厚度 34nm；BARC， $n=1.8$ ， $k=0.46$ ；厚度为 100nm 的化学放大光刻胶， $n=1.71$ ， $A_{\text{dil}}=1.88\mu\text{m}^{-1}$ ， $B_{\text{dil}}=0.0\mu\text{m}^{-1}$ ， $C_{\text{dil}}=0.015\text{cm}^2/\text{mJ}$

### 9.3.2 多晶硅线附近的光刻胶残留

在某些情况下，例如 BARC 材料与特定工艺步骤不兼容时，不能采用化学机械抛光（CMP）和 BARC 降低硅片形貌效应的影响，而且 BARC 和 CMP 会增加工艺的时间和成本。图 9.22 为一个典型的例子。为了简化讨论，在如图所示的仿真中，假设基底与光刻胶的折射率相同。在 500nm 厚的光刻胶中埋入一根 70nm 宽、175nm 高的多晶硅线。这根多晶硅线是后续注入步骤的掩模，是由之前的光刻和刻蚀产生的。由于 BARC 会影响离子注入的特性，因此没有使用 BARC。图中图形为线宽 250nm、周期 1000nm 的线条。这些线条垂直于多晶硅线。

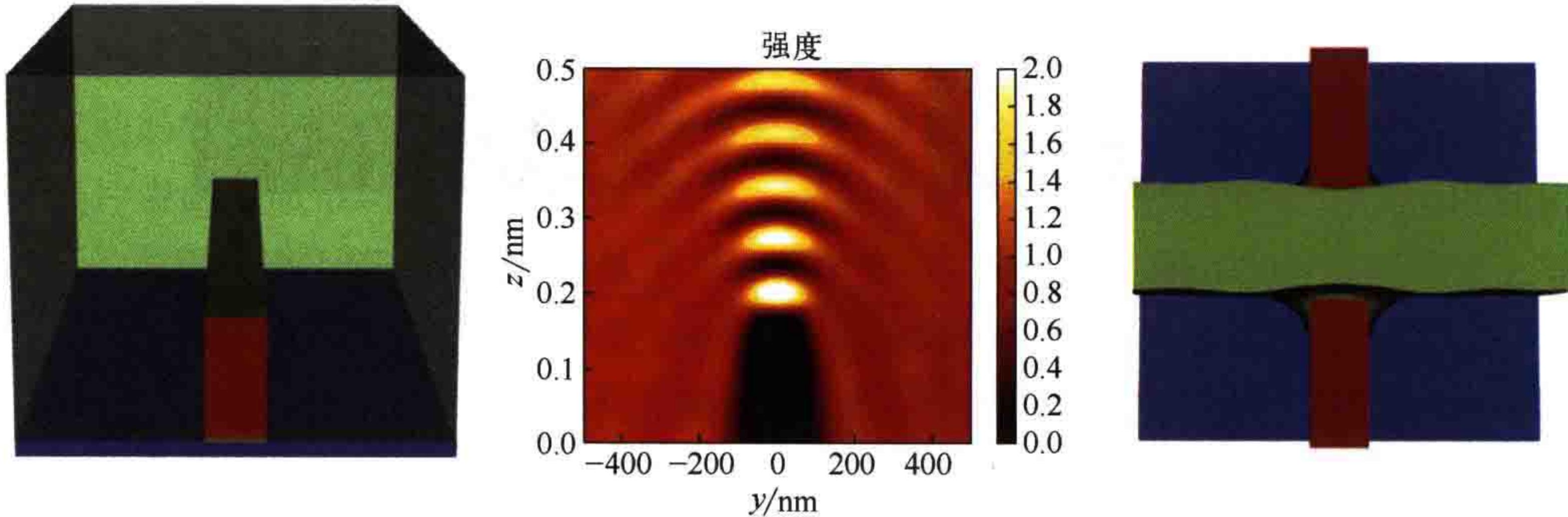


图 9.22 硅片面微细多晶硅台阶的光刻曝光和光刻胶工艺的严格仿真结果。  
本仿真例中没有使用 BARC。左图为硅片膜层几何结构侧视图。中图为过硅片膜层中心的膜层内强度分布截面图。右图为光刻工艺后的光刻胶形貌俯视图。  
曝光参数： $\lambda=248\text{nm}$ ，非偏振圆形照明， $\sigma$  为 0.45， $\text{NA}=0.6$ 。二元掩模：  
250nm 线空图形，周期为 1000nm。硅片膜层：折射率匹配的基底材料，  
中间的多晶硅台阶的高度为 175nm、宽度为 70nm；  
光刻胶为厚 500nm 的化学放大光刻胶

图 9.22 的中间为过空图形中心的光刻胶内强度分布横截面图。多晶硅线不透光，会将光散射到光刻胶的其他位置。多晶硅线顶部的散射光在光刻胶相应区域引起了明显的驻波效应。多晶硅线的垂直边缘将光散射至左右两侧，降低了光刻胶相应区域的局部曝光剂量。多晶硅线左右两侧的曝光剂量减小，会在多晶硅线底部附近形成光刻胶残留（如图 9.22 右侧所示）。多晶硅线顶部的散射光增加了线宽变化。文献 [74, 75] 对各种曝光场景下的光刻胶残留效应进行了系统的仿真研究，包括与实验数据之间的比较。表明光刻胶残留的大小取决于掩模上入射光的方向。强离轴照明有助于减少光刻胶残留。

### 9.3.3 双重图形技术中的线宽变化

本节最后举例说明硅片形貌效应对双重图形技术（DPT）的重要性。图 9.23 为光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀（LFLE）工艺中第一次曝光和光刻胶工艺步骤完成后，得到的硅片几何结构。该工艺的目的是利用后续曝光对正交线空图形进行处理后形成（长方形的）接触孔阵列。冻结步骤会改变第一步光刻后光刻胶的折射率。图 9.23 左图假设冻结使光刻胶中心部分的折射率增加 0.03。

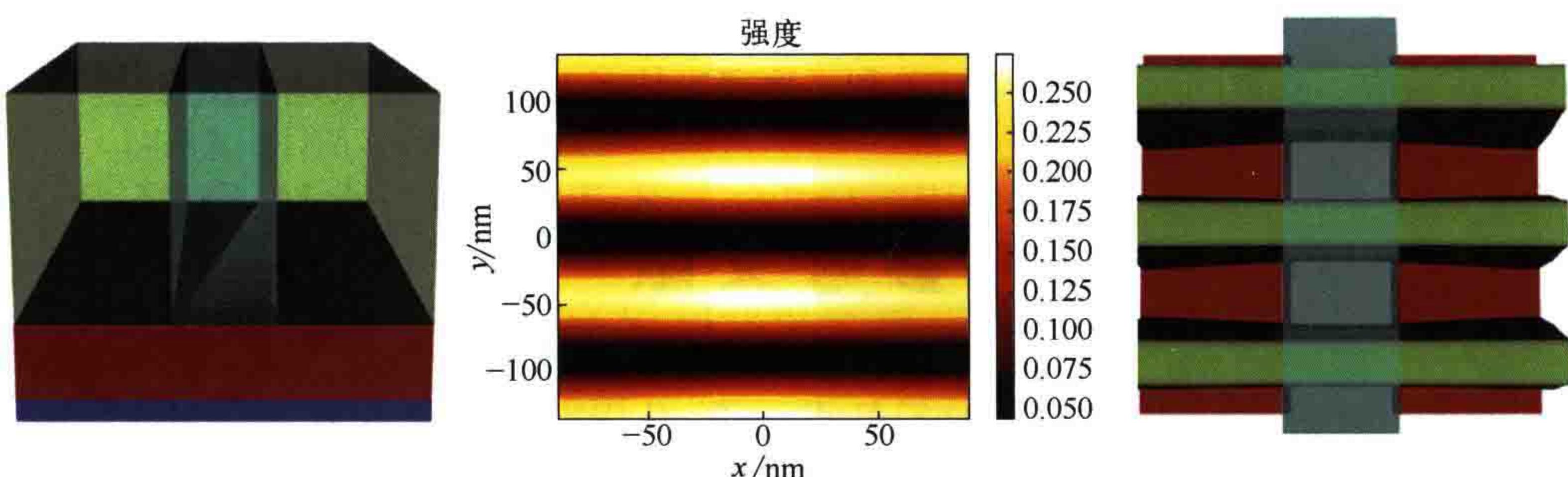


图 9.23 LFLE 工艺中第二次光刻曝光和光刻胶工艺的严格仿真结果。

左图为硅片膜层几何结构侧视图。中图为光刻胶底部强度分布的俯视图。

右图为光刻工艺后的光刻胶形貌俯视图。曝光参数： $\lambda=193\text{nm}$ ，偏振二极照明， $\sigma$  为 0.76、0.89，极张角为  $35^\circ$ ， $\text{NA}=1.25$ 。衰减型相移掩模：90nm 密集线空图形。硅片膜层：100nm 厚的化学放大光刻胶，下面是 BARC 和硅片。第一次曝光后冻结得到的 90nm 光刻胶线，位于中间位置，折射率略有增加。详细内容请见邵峰等人发表的论文<sup>[19]</sup>

折射率变大后更多的光会偏折进来，在光刻胶底部产生强度分布。如图 9.23 中所示。冻结的光刻胶附近局部曝光剂量较高，使得第二次曝光后线宽发生变化（见图 9.23 右图）。文献 [76] 系统、定量地研究了不同周期的图形在第二次光刻后的线宽变化与冻结引起的光刻胶光学性质变化的关系，他们研究了利用严格硅片形貌效应仿真选择合适材料的方法、确定冻结过程中允许的折射率变化量的方法，并利用严格硅片形貌效应仿真优化双重图形技术中图形的设计拆分。其他人也利用类

似的建模技术研究了第二次光刻胶旋涂和硅片形貌效应对双重图形工艺第二次光刻的影响。

## 9.4 总结

随着掩模和硅片面特征尺寸的减小，电磁散射效应在先进光刻中的重要性越来越高。可采用严格电磁场（EMF）仿真方法描述这些效应。波导法（或严格耦合波分析，RCWA）与时域有限差分（FDTD）法是光刻中最流行的严格电磁仿真方法。

掩模形貌效应是指不能用薄掩模和基尔霍夫方法来描述的掩模衍射效应。这些效应包括衍射光的强度（衍射效率）、相位和偏振的变化。真实掩模对光的衍射取决于掩模材料的光学特性（折射率和消光系数）、吸收层的厚度/几何形状，以及照明方向。对掩模进行光学邻近效应修正时必须考虑掩模形貌效应。此外，实际 DUV 与 EUV 掩模对光的衍射作用会引入与周期有关的最佳焦面偏移等类似于投影物镜波像差的相位效应。

硅片图形对光的散射导致了硅片形貌效应。这种效应可以在非平面硅片上产生反射槽、光刻胶残留，以及 CD 变化。优化底部抗反射涂层（BARC）时，必须考虑这些效应。双重图形技术（DPT）和二次曝光技术对硅片形貌效应非常敏感。

## 参 考 文 献

- [1] V. Singh, B. Hu, K. Toh, S. Bollepalli, S. Wagner, and Y. Borodovsky, “Making a trillion pixels dance,” *Proc. SPIE* **6924**, 69240S, 2008.
- [2] H. P. Urbach and D. A. Bernard, “Modeling latent-image formation in photolithography, using the Helmholtz equation,” *J. Opt. Soc. Am. A* **6**, 1343–1356, 1989.
- [3] G. Wojcik, J. Mould, R. Ferguson, R. Martino, and K. K. Low, “Some image modeling issues for i-line, 5x phase shifting masks,” *Proc. SPIE* **2197**, 455, 1994.
- [4] S. Burger, R. Köhle, L. Zschiedrich, H. Nguyen, F. Schmidt, R. März, and C. Nölscher, “Rigorous simulation of 3D masks,” *Proc. SPIE* **6349**, 63494Z, 2006.
- [5] Z. Rahimi, A. Erdmann, C. Pflaum, and P. Evanschitzky, “Rigorous EMF simulation of absorber shape variations and their impact on the lithographic process,” *Proc. SPIE* **7545**, 75450C, 2010.
- [6] M. S. Yeung, “A next-generation EMF simulator for EUV lithography based on the pseudo-spectral time-domain method,” *Proc. SPIE* **8322**,

83220D, 2012.

- [7] K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* **14**, 302–307, 1966.
- [8] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House, Norwood, Massachusetts, 1995.
- [9] R. Luebbers, F. Hunsberger, and K. S. Kunz, “A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* **39**, 29, 1991.
- [10] J.-P. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *J. Comput. Phys.* **114**, 185–200, 1994.
- [11] A. K.-K. Wong and A. R. Neureuther, “Rigorous three-dimensional time-domain finite-difference electromagnetic simulation for photolithographic applications,” *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **8**, 419–431, 1995.
- [12] J. Liu, M. Brio, and J. V. Moloney, “Subpixel smoothing finite-difference time-domain method for material interface between dielectric and dispersive media,” *Opt. Lett.* **37**, 4802–4804, 2012.
- [13] A. R. Zakharian, M. Brio, C. Dineen, and J. V. Moloney, “Second-order accurate FDTD space and time grid refinement method in three space dimensions,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18**, 1237–1239, 2006.
- [14] K. Lucas, H. Tanabe, and A. J. Strojwas, “Efficient and rigorous three-dimensional model for optical lithography dimulation,” *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 2187–2199, 1996.
- [15] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, “Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction,” *J. Opt. Soc. Am.* **71**, 811–818, 1981.
- [16] D. Nyysönen, “Theory of optical edge detection and imaging of thick layers,” *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 1425, 1982.
- [17] H. Kim, J. Park, and B. Lee, *Fourier Modal Method and its Applications in Computational Nanophotonics*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2012.
- [18] P. Evanschitzky and A. Erdmann, “Fast near field simulation of optical and EUV masks using the waveguide method,” *Proc. SPIE* **6533**, 65530Y, 2007.
- [19] F. Shao, P. Evanschitzky, T. Fühner, and A. Erdmann, “Efficient simulation and optimization of wafer topographies in double patterning,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(4), 43070, 2009.
- [20] P. Lalanne and G. M. Morris, “Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization,” *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 779–784, 1996.
- [21] L. Li, “Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures,” *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 1870–1876, 1996.
- [22] A. Erdmann, P. Evanschitzky, G. Citarella, T. Fühner, and P. De Bisschop, “Rigorous mask modeling using waveguide and FDTD methods: An assessment for typical hyper NA imaging problems,” *Proc.*

- SPIE* **6283**, 628319, 2006.
- [23] A. Erdmann, T. Fühner, P. Evanschitzky, V. Agudelo, C. Freund, P. Michalak, and D. Xu, “Optical and EUV projection lithography: A computational view,” *Microelectron. Eng.* **132**, 21–34, 2015.
  - [24] D. Flagello, B. Geh, S. Hansen, and M. Totzeck, “Polarization effects associated with hyper-numerical-aperture lithography,” *J. Micro/Nano-lithogr. MEMS MOEMS* **4**(3), 31104, 2005.
  - [25] M. Yoshizawa, V. Philipsen, and L. H. A. Leunissen, “Optimizing absorber thickness of attenuating phase-shifting masks for hyper-NA lithography,” *Proc. SPIE* **6154**, 61541E, 2006.
  - [26] A. Erdmann and P. Evanschitzky, “Rigorous electromagnetic field mask modeling and related lithographic effects in the low  $k_1$  and ultrahigh NA regime,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **6**(3), 31002, 2007.
  - [27] A. Erdmann, “Topography effects and wave aberrations in advanced PSM-technology,” *Proc. SPIE* **4346**, 345–355, 2001.
  - [28] A. Erdmann, T. Fühner, S. Seifert, S. Popp, and P. Evanschitzky, “The impact of the mask stack and its optical parameters on the imaging performance,” *Proc. SPIE* **6520**, 65201I, 2007.
  - [29] A. Erdmann, P. Evanschitzky, G. Bottiglieri, E. van Setten, and T. Fliervoet, “3D mask effects in high NA EUV imaging,” *Proc. SPIE* **10957**, 219–231, 2019.
  - [30] A. Erdmann, G. Citarella, P. Evanschitzky, H. Schermer, V. Philipsen, and P. De Bisschop, “Validity of the Hopkins approximation in simulations of hyper-NA line-space structures for an attenuated PSM mask,” *Proc. SPIE* **6154**, 61540G, 2006.
  - [31] K. Adam, M. C. Lam, N. Cobb, and O. Toublan, “Application of the hybrid Hopkins-Abbe method in full-chip OPC,” *Microelectron. Eng.* **86**, 492–496, 2008.
  - [32] A. K.-K. Wong and A. R. Neureuther, “Mask topography effects in projection printing of phase-shifting masks,” *IEEE Trans. on Electron Devices* **41**, 895–902, 1994.
  - [33] C. Friedrich, L. Mader, A. Erdmann, S. List, R. Gordon, C. Kalus, U. Griesinger, R. Pforr, J. Mathuni, G. Ruhl, and W. Maurer, “Optimising edge topography of alternating phase shift masks using rigorous mask modelling,” *Proc. SPIE* **4000**, 1323, 2000.
  - [34] J. Ruoff, J. T. Neumann, E. Smitt-Weaver, E. van Setten, N. le Masson, C. Progler, and B. Geh, “Polarization induced astigmatism caused by topographic masks,” *Proc. SPIE* **6730**, 67301T, 2007.
  - [35] A. Erdmann, F. Shao, P. Evanschitzky, and T. Fühner, “Mask topography induced phase effects and wave aberrations in optical and extreme ultraviolet lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **28**, C6J1, 2010.
  - [36] G. McIntyre, M. Hibbs, T. Faure, J. Tirapu-Azpiroz, G. Han, R. Deschner, B. Morgenfeld, S. Ramaswamy, A. Wagner, T. Brunner,

- S. Halle, and Y. Kikuchi, “Lithographic qualification of new opaque MoSi binary mask blank for the 32-nm node and beyond,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **9**(1), 13010, 2010.
- [37] P. Dirksen, J. Braat, A. J. E. M. Janssen, and C. Juffermans, “Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **2**(1), 61–68, 2003.
- [38] G. C. Robins and A. R. Neureuther, “Are pattern and probe aberration monitors ready for prime time?” *Proc. SPIE* **5754**, 1704, 2005.
- [39] L. Duan, X. Wang, G. Yan, and A. Bourov, “Practical application of aerial image by principal component analysis to measure wavefront aberration of lithographic lens,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **11**(2), 23009, 2012.
- [40] J. Finders, M. Dusa, P. Nikolsky, Y. van Dommelen, R. Watson, T. Vandeweyer, J. Beckaert, B. Laenens, and L. van Look, “Litho and patterning challenges for memory and logic applications at the 22nm node,” *Proc. SPIE* **7640**, 76400C, 2010.
- [41] T. Fühner, P. Evanschitzky, and A. Erdmann, “Mutual source, mask and projector pupil optimization,” *Proc. SPIE* **8322**, 83220I, 2012.
- [42] M. K. Sears, J. Bekaert, and B. W. Smith, “Lens wavefront compensation for 3D photomask effects in subwavelength optical lithography,” *Appl. Opt.* **52**, 314, 2013.
- [43] A. Erdmann and C. Friedrich, “Rigorous diffraction analysis for future mask technology,” *Proc. SPIE* **4000**, 684, 2000.
- [44] A. Erdmann, D. Xu, P. Evanschitzky, V. Philipsen, V. Luong, and E. Hendrickx, “Characterization and mitigation of 3D mask effects in extreme ultraviolet lithography,” *Adv. Opt. Technol.* **6**, 187–201, 2017.
- [45] M. Burkhardt, A. D. Silva, J. Church, L. Meli, C. Robinson, and N. Felix, “Investigation of mask absorber induced image shift in EUV lithography,” *Proc. SPIE* **10957**, 1095710, 2019.
- [46] C.-T. Shih, S.-S. Yu, Y.-C. Lu, C.-C. Chung, J. J. H. Chen, and A. Yen, “Mitigation of image contrast loss due to mask-side non-telecentricity in an EUV scanner,” *Proc. SPIE* **9422**, 94220Y, 2015.
- [47] J. Finders, L. de Winter, and T. Last, “Mitigation of mask three-dimensional induced phase effects by absorber optimization in ArFi and extreme ultraviolet lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **15**(2), 21408, 2016.
- [48] X. Liu, R. Howell, S. Hsu, K. Yang, K. Gronlund, F. Driessens, H.-Y. Liu, S. Hansen, K. van Ingen Schenau, T. Hollink, P. van Adrichem, K. Troost, J. Zimmermann, O. Schumann, C. Hennerkes, and P. Gräupner, “EUV source-mask optimization for 7nm node and beyond,” *Proc. SPIE* **9048**, 171–181, 2014.
- [49] A. Armeanu, V. Philipsen, F. Jiang, G. Fenger, N. Lafferty, W. Gillijns, E. Hendrickx, and J. Sturtevant, “Enabling enhanced EUV lithographic performance using advanced SMO, OPC, and RET,” *Proc. SPIE* **10809**,

- 85–93, 2019.
- [50] A. Erdmann, P. Evanschitzky, J. T. Neumann, and P. Gräupner, “Mask-induced best-focus shifts in deep ultraviolet and extreme ultraviolet lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **15**(2), 21205, 2016.
  - [51] T. Last, L. de Winter, P. van Adrichem, and J. Finders, “Illumination pupil optimization in 0.33-NA extreme ultraviolet lithography by intensity balancing for semi-isolated dark field two-bar M1 building blocks,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **15**(4), 043508, 2016.
  - [52] S. D. Hsu and J. Liu, “Challenges of anamorphic high-NA lithography and mask making,” *Adv. Opt. Technol.* **6**, 293–310, 2017.
  - [53] V. Philipsen, K. V. Luong, L. Souriau, A. Erdmann, D. Xu, P. Evanschitzky, R. W. E. van de Kruijs, A. Edrisi, F. Scholze, C. Laubis, M. Irmscher, S. Naasz, C. Reuter, and E. Hendrickx, “Reducing extreme ultraviolet mask three-dimensional effects by alternative metal absorbers,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **16**(4), 041002, 2017.
  - [54] A. Erdmann, P. Evanschitzky, H. Mesilhy, V. Philipsen, E. Hendrickx, and M. Bauer, “Attenuated phase shift mask for extreme ultraviolet: Can they mitigate three-dimensional mask effects?,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **18**(1), 011005, 2018.
  - [55] V. Philipsen, K. V. Luong, K. Opsomer, C. Detavernier, E. Hendrickx, A. Erdmann, P. Evanschitzky, R. W. E. van de Kruijs, Z. Heidarnia-Fathabad, F. Scholze, and C. Laubis, “Novel EUV mask absorber evaluation in support of next-generation EUV imaging,” *Proc. SPIE* **10810**, 108100C, 2018.
  - [56] F. J. Timmermans, C. van Lare, J. McNamara, E. van Setten, and J. Finders, “Alternative absorber materials for mitigation of mask 3D effects in high NA EUV lithography,” *Proc. SPIE* **10775**, 107750U, 2018.
  - [57] A. Erdmann, H. Mesilhy, P. Evanschitzky, V. Philipsen, F. Timmermans, and M. Bauer, “Perspectives and tradeoffs of novel absorber materials for high NA EUV lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **19**(4), 041001, 2020.
  - [58] J. Finders, R. de Kruif, F. Timmermans, J. G. Santaclara, B. Connely, M. Bender, F. Schurack, T. Onoue, Y. Ikebe, and D. Farrar, “Experimental investigation of a high-k reticle absorber system for EUV lithography,” *Proc. SPIE* **10957**, 268–276, 2019.
  - [59] H. Mesilhy, P. Evanschitzky, G. Bottiglieri, E. van Setten, T. Fliervoet, and A. Erdmann, “Pathfinding the perfect EUV mask: The role of the multilayer,” *Proc. SPIE* **11323**, 244–259, 2020.
  - [60] A. K.-K. Wong, R. Guerrieri, and A. R. Neureuther, “Massively parallel electromagnetic simulation for photolithographic applications,” *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* **14**, 1231, 1995.
  - [61] H. Kim, I.-M. Lee, and B. Lee, “Extended scattering-matrix method for

- efficient full parallel implementation of rigorous coupled-wave analysis,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 2313–2327, 2007.
- [62] K.-H. Kim, K. Kim, and Q.-H. Park, “Performance analysis and optimization of three-dimensional FDTD on GPU using roofline model,” *Comput. Phys. Commun.* **182**, 1201–1207, 2011.
- [63] J. Tong and S. Chen, “Computation improvement for the rigorous coupled-wave analysis with GPU,” in *Fourth International Conference on Computational and Information Sciences*, 2012.
- [64] K. Adam and A. R. Neureuther, “Domain decomposition methods for the rapid electromagnetic simulation of photomask scattering,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **1**, 253–269, 2002.
- [65] F. Shao, P. Evanschitzky, D. Reibold, and A. Erdmann, “Fast rigorous simulation of mask diffraction using the waveguide method with parallelized decomposition technique,” *Proc. SPIE* **6792**, 679206, 2008.
- [66] J. Tirapu-Azpiroz, P. Burchard, and E. Yablonovitch, “Boundary layer model to account for thick mask effects in photolithography,” *Proc. SPIE* **5040**, 1611, 2003.
- [67] M. C. Lam and A. R. Neureuther, “Simplified model for absorber feature transmissions on EUV masks,” *Proc. SPIE* **6349**, 63492H, 2006.
- [68] Y. Cao, X. Wang, A. Erdmann, P. Bu, and Y. Bu, “Analytical model for EUV mask diffraction field calculation,” *Proc. SPIE* **8171**, 81710N, 2011.
- [69] V. Agudelo, P. Evanschitzky, A. Erdmann, T. Fühner, F. Shao, S. Limmer, and D. Fey, “Accuracy and performance of 3D mask models in optical projection lithography,” *Proc. SPIE* **7973**, 79730O, 2011.
- [70] V. Agudelo, P. Evanschitzky, A. Erdmann, and T. Fühner, “Evaluation of various compact mask and imaging models for the efficient simulation of mask topography effects in immersion lithography,” *Proc. SPIE* **8326**, 832609, 2012.
- [71] V. Agudelo, T. Fühner, A. Erdmann, and P. Evanschitzky, “Application of artificial neural networks to compact mask models in optical lithography simulation,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **13**(1), 11002, 2013.
- [72] T. Matsuzawa, A. Moniwa, N. Hasegawa, and H. Sunami, “Two-dimensional simulation of photolithography on reflective stepped substrate,” *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* **6**, 446, 1987.
- [73] M. S. Yeung and A. R. Neureuther, “Three-dimensional reflective-notching simulation using multipole-accelerated physical optics approximation,” *Proc. SPIE* **2440**, 395, 1995.
- [74] A. Erdmann, C. K. Kalus, T. Schmöller, Y. Klyonova, T. Sato, A. Endo, T. Shibata, and Y. Kobayashi, “Rigorous simulation of exposure over nonplanar wafers,” *Proc. SPIE* **5040**, 101, 2003.
- [75] T. Sato, A. Endo, K. Hashimoto, S. Inoue, T. Shibata, and

- Y. Kobayashi, "Resist footing variation and compensation over nonplanar wafer," *Proc. SPIE* **5040**, 1521, 2003.
- [76] A. Erdmann, F. Shao, J. Fuhrmann, A. Fiebach, G. P. Patsis, and P. Trefonas, "Modeling of double patterning interactions in litho-curing-litho-etch (LCLE) processes," *Proc. SPIE* **76740**, 76400B, 2010.
- [77] S. A. Robertson, M. T. Reilly, T. Graves, J. J. Biafore, M. D. Smith, D. Perret, V. Ivin, S. Potashov, M. Silakov, and N. Elistratov, "Simulation of optical lithography in the presence of topography and spin-coated films," *Proc. SPIE* **7273**, 727340, 2009.

# 第 10 章 ➤

## 先进光刻中的随机效应

前面章节中我们利用连续变量描述光和光刻胶的性质。这种描述方法无法解释几十纳米及更小分辨率光刻中的随机效应和现象。这些随机现象包括光刻胶图形的边缘粗糙度、图形关键尺寸与位置的局部微小变化，以及偶然性的非系统性光刻错误等。为了理解这些随机现象，需要了解能量（光）和物质（光刻胶）的离散性以及有关反应或者物理化学过程的随机性。本章介绍先进光刻技术中的随机效应。

本章概述几个重要的离散变量和物理化学过程及其导致的光刻现象、对应的建模方法，以及各种物理量和效应之间的关系。将解释 Chris Mack<sup>[1]</sup> 的话：“随机效应定义了光刻的极限”。最后一节讨论几种随机效应缓解策略，特别是新型光刻胶材料的研发和应用，以尽可能地将光刻极限推向更远。本章提供了大量关于随机效应的参考资料，见参考文献部分。

### 10.1 随机变量与过程

光由光子组成，每个光子的能量为

$$E_{\text{photon}} = hf = hc / \lambda \quad (10.1)$$

式中， $h$  为普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )； $c$  是光在真空中的速度 ( $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ )； $f$  和  $\lambda$  分别为光的频率和波长。给定曝光剂量  $D$ ，面积  $A$  上入射光子的平均数量  $\bar{N}_{\text{photon}}$  可表示为：

$$\bar{N}_{\text{photon}} = \frac{DA}{E_{\text{photon}}} = \frac{DA\lambda}{hc} \quad (10.2)$$

由于 EUV 光的波长很短 ( $\lambda=13.5\text{nm}$ )，相同曝光剂量下 EUV 光子的平均数大约为 DUV 光 ( $\lambda=193\text{nm}$ ) 的十四分之一。吸收系数为  $\alpha$ 、厚度为  $d$  的光刻胶吸收的光子的平均数为：

$$\bar{N} = \frac{D\alpha Ad\lambda}{hc} \quad (10.3)$$

图 10.1 左图为正方形区域吸收的 EUV 和 DUV 光子平均数的仿真结果，图中采用了对数坐标。

在某一时刻某一位置，光子随机地从光源射出。因此，在给定区域和给定时间间隔（曝光时间）内，光刻胶吸收光子的实际数量围绕式（10.3）所示的平均值波动。光子的实际数量服从泊松分布，其标准差为：

$$\sigma_{\text{photon}} = 1/\sqrt{\bar{N}} = \sqrt{\frac{hc}{\lambda}} \sqrt{\frac{1}{Ad}} \sqrt{\frac{1}{\alpha D}} \quad (10.4)$$

光子散粒噪声即吸收的光子数的变化，是导致随机现象的根本原因之一。从式（10.4）和图 10.1 可以知道什么情况下光子散粒噪声变得不可忽略。

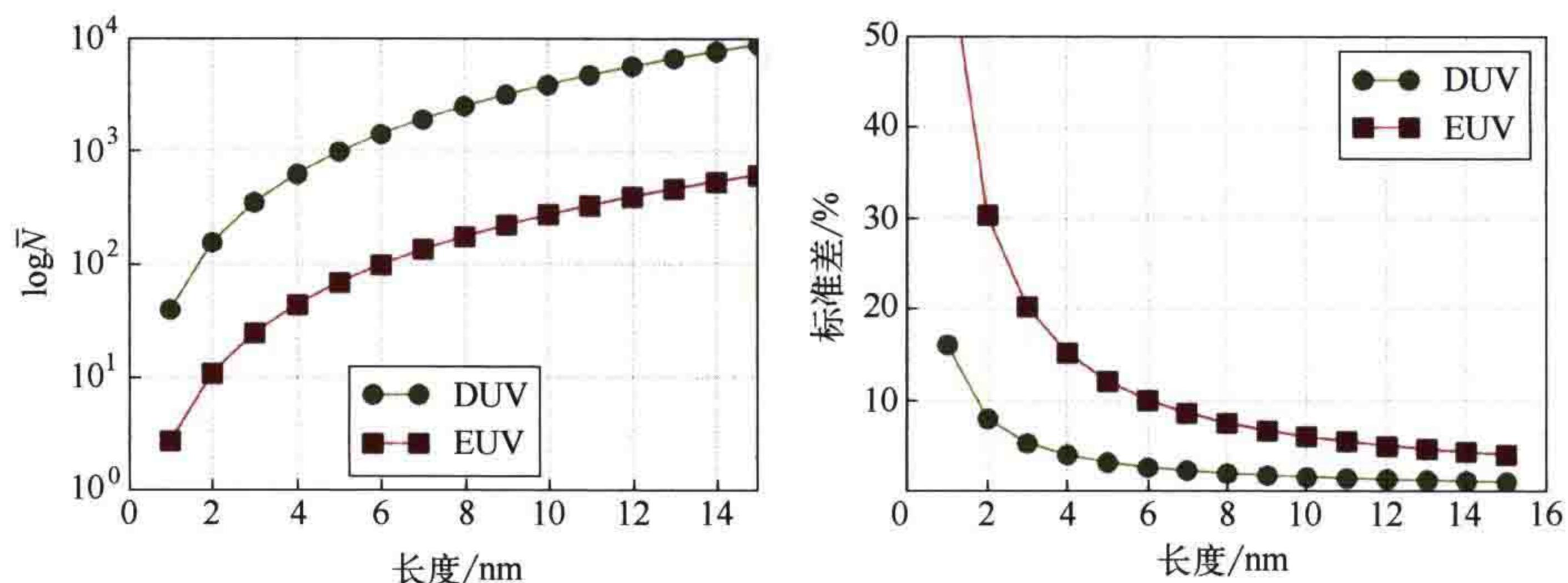


图 10.1 吸收的光子的平均数  $\bar{N}$  的计算结果（左图）与相应的归一化标准差（右图）。DUV 波长为 193nm，EUV 波长为 13.5nm。光刻胶厚度为 50nm，吸收系数  $\alpha=4\mu\text{m}^{-1}$ ，曝光剂量  $D=20\text{mJ/cm}^2$ 。横坐标为正方形曝光区域的边长

首先，是否变得重要取决于所考察的体积  $Ad$ （如果光刻胶的厚度  $d$  固定，只需考虑面积  $A$ ）。Neureuther 和 Willson<sup>[3]</sup> 给出了 X 射线光刻散粒噪声的临界值，即 CD/4 体积内光子数为 1000 时随机效应变得重要。图 10.1 显示了 CD 为 20nm 时，边长为 5nm 的立方体内的光子数。吸收的 DUV 光子数量约为 1000，吸收的 EUV 光子数量小于 100。图中 5nm 长度的标准差约为 10%，充分表明了光子噪声对 EUV 光刻的重要性。

从式（10.4）可以得出两种减少随机效应的方法：增加曝光剂量或增强光刻胶对光的吸收。10.4 节将讨论此类缓解策略。

曝光掩模图形时光子的分布与空间像或者光刻胶内像强度的分布一致。图 10.2 给出了 DUV 与 EUV 光照下光刻胶吸收的光子分布的仿真结果。掩模图形为接触孔。本仿真例假设 EUV 与 DUV 光刻空间像相同，突出显示 EUV 光子的散粒噪声效应。

在掩模透光区光刻胶吸收的光子数多，在非透光区吸收的光子数少。DUV 光子数量更多，使得两个区域之间的过渡变得平滑。

造成随机效应的另一个因素是光刻胶。光刻胶由离散的分子、单体和有限大小的聚合物组成。当考察的体积很小时，第 3 章中使用的化学浓度概念就失去了意义<sup>[4]</sup>。几位作者给出了标准化学放大光刻胶的典型平均数<sup>[1, 5, 6]</sup>。对于边长为 10nm 的立方体，PAG 分子的平均数在 40 到 200 之间，猝灭剂分子在 10 到 30 之间，保护基团在 1000 到 2000 之间。所考察体积内 PAG 分子、猝灭剂分子和保护基团的实际数量也是随机变量。光刻胶中化学成分的随机分布决定了化学噪声。

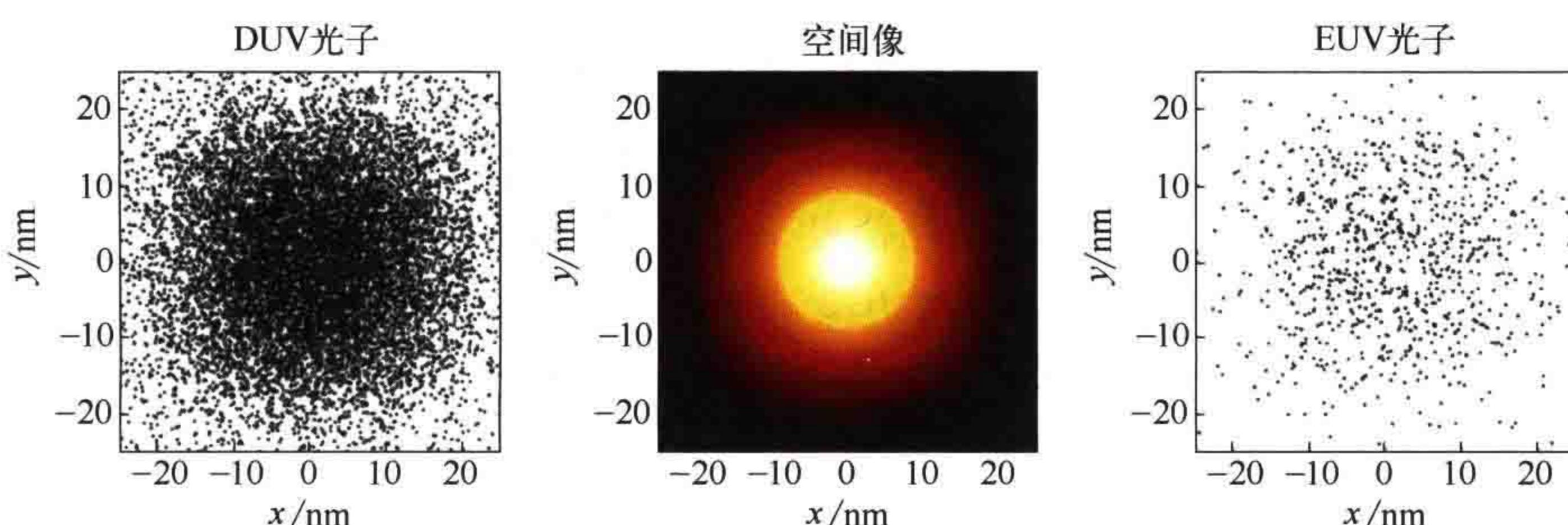


图 10.2 空间像仿真结果与吸收光子的平均数。DUV（左图）与 EUV（右图）光照射下光刻胶所吸收光子的分布。中图为接触孔的空间像

上一段中的数据以及仿真结果都表明，猝灭剂分子的分布很大程度上决定了化学噪声对光刻的影响。但是，最终造成影响的不是相对猝灭剂噪声，而是相对于酸分子平均数的绝对猝灭剂噪声<sup>[7]</sup>。

通常假设化学成分的分布遵循泊松统计。但这种假设有一定的局限性。例如，PAG 含量高时可能会发生结晶<sup>[8]</sup>。决定光刻胶显影速度的保护基团附着在长链聚合物分子上，它们并不相互独立存在。典型光刻胶中聚合物的体积约为 10nm<sup>3</sup>。该体积的大小也会影响随机现象<sup>[9]</sup>。

光和光刻胶的随机变量在随机过程中相互作用。例如，入射光子可能撞击 PAG 分子产生光酸，也可能穿过光刻胶，不产生光酸。EUV 光子可能会激发二次电子，也可能不会激发。产生的二次电子将经历另一系列的随机过程，最终在光子被吸收的位置周围释放出一定量的光酸。可采用概率数表征这些随机过程，例如量子效率（每吸收一个 EUV 光子释放出的光酸分子的平均数量）以及电子模糊半径（释放光酸的位置与光子被吸收的位置之间的平均距离）等。

曝光后烘焙和显影过程中也会发生类似的随机过程。光酸在被释放的位置附近随机移动，可能使具有保护基团的高分子聚合物发生脱保护反应（或不发生）。光酸也可能遇到猝灭剂分子并产生新的化学成分。常利用动力学反应常数和扩散长度

表征这些随机过程发生的概率。扩散长度也可以被视为是所释放光酸的平均迁移率的度量参数。

在介绍上述随机现象的随机仿真方法、确定某些趋势和微缩需要满足的规则之前，我们先了解一下光刻工艺输出的光刻胶形貌特征及性质等方面的内容。

## 10.2 现象

光子和化学成分的离散性、随机性，以及相关随机过程是光刻胶形貌等存在随机波动的原因。本书前几章介绍的连续模型可以有效地预测平均尺寸 (CD)、位置、光刻胶形貌等光刻工艺的平均结果。光和光刻胶的离散性质导致了光刻工艺的（附加）随机效应。如 Andy Neureuther 和 Grant Willson<sup>[3]</sup> 所指出的，光刻工艺的随机效应既体现为具有统计性的线边粗糙度，也表现为随机缺陷。

图 10.3 左图为线条图形的粗糙边缘示意图。图中的线条表面不平滑、边缘不清晰，光刻胶形貌和边缘的位置沿线条变化。在右侧 SEM 俯视图中也可以看到线条边缘的变化和线条的“扭曲”。

如图 10.3 中图所示，可通过计算线条边缘与理想光滑表面或图形边缘的标准差，定量评估线边粗糙度 (LER)：

$$\sigma_{\text{LER}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_a)^2}{N-1}} \quad (10.5)$$

式中， $x_i$  表示沿线条边缘的  $N$  个离散采样点； $x_a$  是线条边缘位置的平均值。测量数据服从正态分布，99.73% 的测量数据  $x_i$  分布在  $x_a \pm 3\sigma_{\text{LER}}$  范围内。标准差一般在几纳米到 15nm 之间。左右边界的粗糙度不相关，线宽粗糙度 (LWR) 的标准差为  $\sigma_{\text{LWR}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{LER}}$ 。式 (10.5) 忽略了 LER 的空间分布信息 (或空间频率)，不能说明 LER 与线条长度的关系。

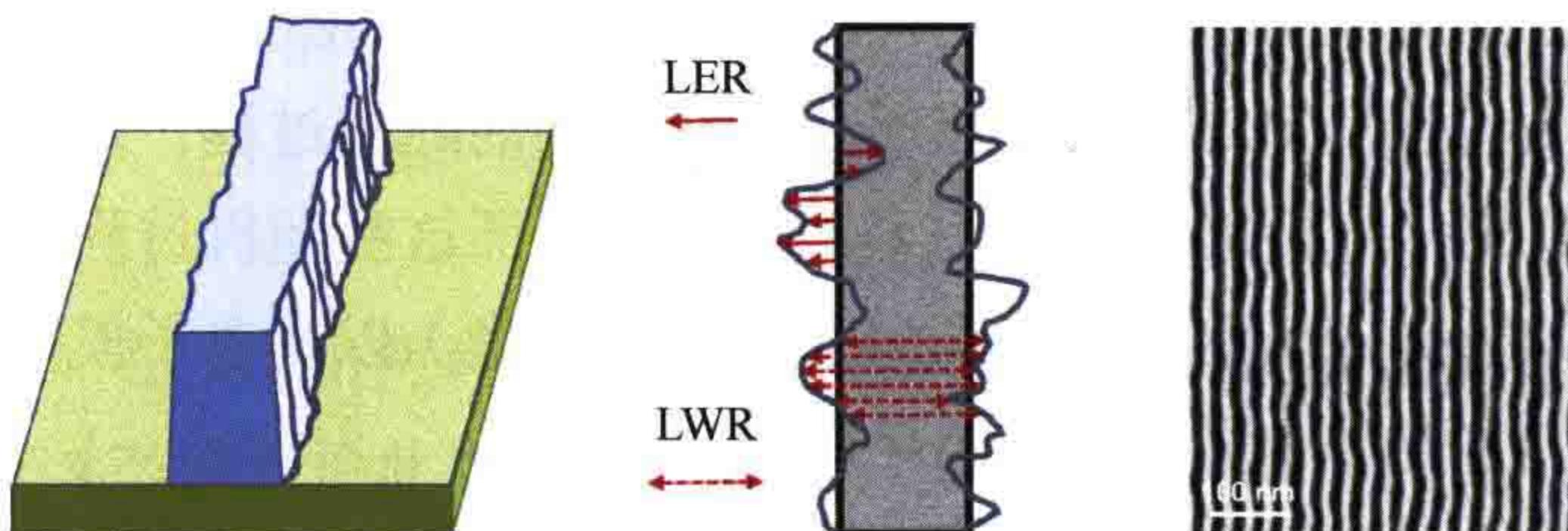


图 10.3 线边粗糙度 (LER) 和线宽粗糙度 (LWR)。左图：线条的粗糙边缘示意图（改编自参考文献 [10]）。中图：LER 测量数据示意图（实线箭头），LWR 测量数据示意图（虚线箭头）。右图：含有 LER 和 LWR 的光刻胶线条的 SEM 俯视图（转自参考文献 [11]）

Constantoudis 等人<sup>[12, 13]</sup> 利用粗糙光刻胶表面与随机分形之间的相似性质提出 LER 定量表征方法。大多数实测光刻胶边缘具有自仿射特性，可以用功率谱密度 (PSD) 描述，如图 10.4 所示。

PSD 定义在空间频率域。低空间频率描述了沿线条方向大周期的慢变化成分。高空间频率是小周期的快速变化成分（另请参见 2.2.1 节成像部分关于空间频率概念的讨论）。PSD 的三个特征参数为： $\text{PSD}_0$ （无限长线条的 PSD）、相关长度  $\xi$  和粗糙度指数  $H$ <sup>[12, 14]</sup>：

$$\text{PSD}(f) = \frac{\text{PSD}_0}{1 + |2\pi f \xi|^{2H+1}} \quad (10.6)$$

图 10.4 的第二行为第一行中各个 PSD 函数对应的特征边缘的形状。

需要注意的是，标准差的测量值取决于实测边缘的长度  $L$ ： $\sigma_{\text{LER}}^2(L)$ 。只有当  $L$  足够大时  $\sigma_{\text{LER}}^2(L)$  才与长度无关。常数 LER 值所对应的边缘长度由相关长度  $\xi$  决定。测量 LER 时使用的  $L$  大约为  $1\mu\text{m}$ 。

$\text{PSD}_0$  和足够长边缘的标准差之间的关系为<sup>[14]</sup>：

$$\sigma_{\text{LER}}^2 = \frac{\text{PSD}_0}{(1.2H + 1.4)\xi} \quad (10.7)$$

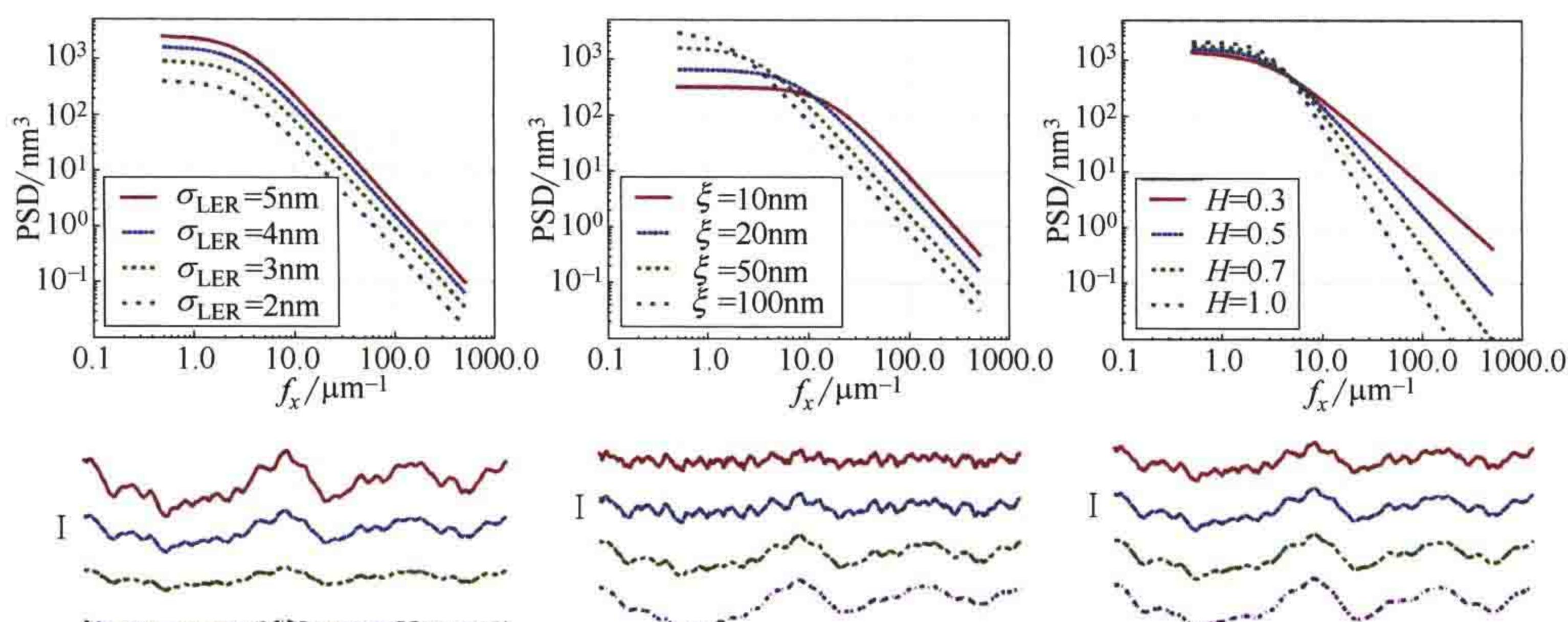


图 10.4 式 (10.6) 和式 (10.7) 定义的 LER 的空间频率特性。第一行：粗糙度的典型功率谱密度。第二行：相应的线条边缘。左图、中图和右图分别为标准差  $\sigma_{\text{LER}}$ 、相关长度  $\xi$  和粗糙度指数  $H$  对 PSD 的影响。 $\sigma_{\text{LER}}=4\text{nm}$ ,  $\xi=50\text{nm}$ ,  $H=0.5$ 。线条边缘图左侧的黑色比例尺表示高度为  $5\text{nm}$

沿着边缘粗糙的线条测量 CD，可以得到平均值附近 CD 值的分布。此分布的宽度表示局部 CD 均匀性 (LCDU)。LCDU 和 LWR 关于线条长度的变化规律相反，两者具有互补的行为表现<sup>[15]</sup>。对光刻随机性的分析已经从线条图形扩展到接触孔和其他二维图形<sup>[16]</sup>。

利用 SEM 数据进行 LER 实验分析，必须考虑 SEM 测量导致的随机效应。利用专用算法可将 SEM 产生的噪声从粗糙度测量数据中去除，获得无偏差的粗糙度数据<sup>[17, 18]</sup>。有关 LER 和 LWR 计量等方面的内容和讨论可参考 Vassilios Constantoudis 等人<sup>[17, 19]</sup> 和 Chris Mack<sup>[14, 20]</sup> 的论文。

光刻图形的粗糙度会影响电子元件的电气性能，尤其是线路电阻和栅极漏电流。而随机效应可能会产生更加明显的影响。图 10.5 中的 SEM 照片显示了几种随机缺陷，包括桥连、断线、接触孔的缺失和融合<sup>[21]</sup>。这种缺陷发生的概率一般非常低，因此，这些缺陷有时被称为“黑天鹅”事件。这种缺陷将导致器件故障，并限制工艺良率。

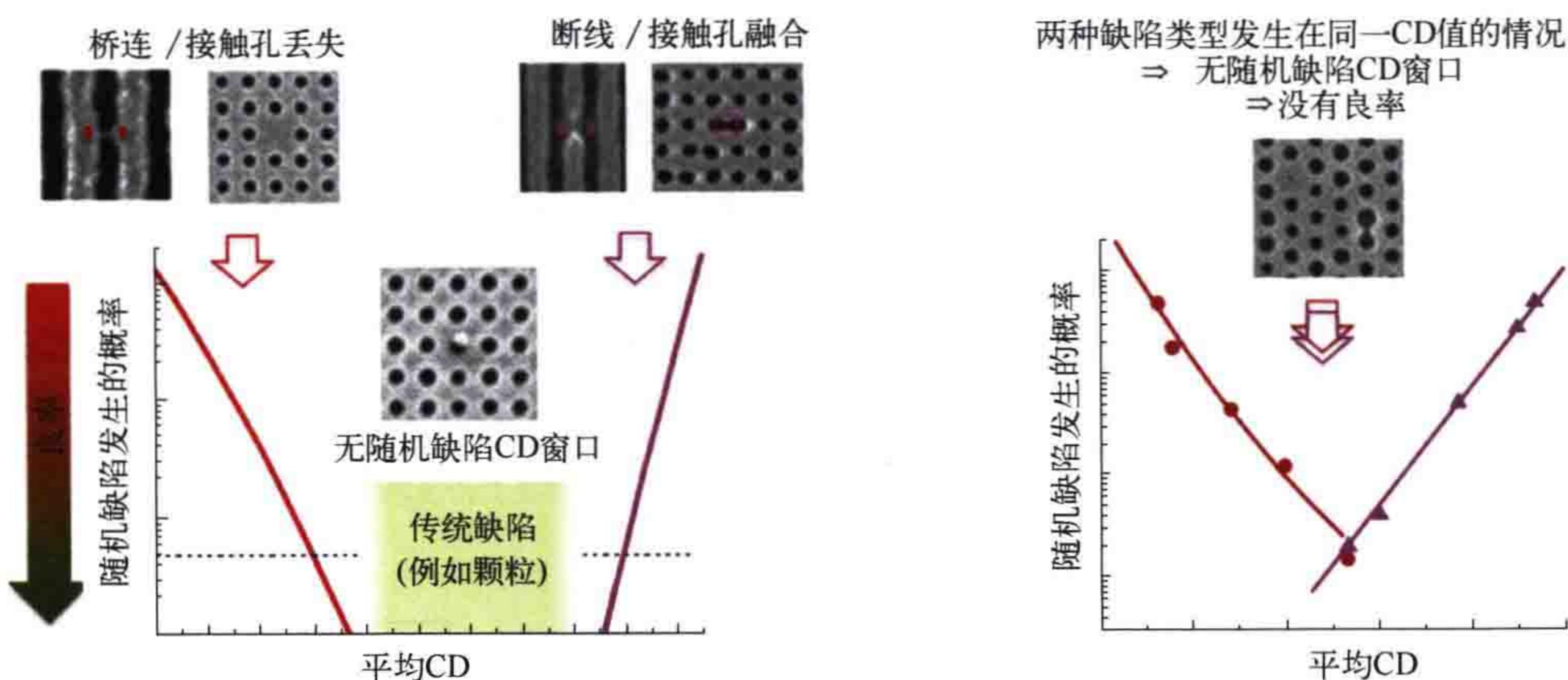


图 10.5 线空图形与接触孔阵列的 CD 与随机缺陷之间的关系图。对应横轴两侧的 CD 值出现了两种不同类型的缺陷。转载自参考文献 [21]

Peter De Bisschop 引入了一种新的光刻评价方法来量化随机效应，称为 NOK (not OK)<sup>[21, 22]</sup>。图 10.5 为随机缺陷发生的概率（纵轴采用了对数坐标）关于平均 CD 的变化趋势示意图。图中左右两侧都可能出现随机缺陷。CD 分布宽度的增加将增加随机缺陷发生的概率，降低良率。CD 分布太宽时，工艺可能无法实现足够高的良率。有关随机缺陷的详细分析和讨论，请参见 Peter De Bisschop 的论文<sup>[21, 22]</sup>。

## 10.3 建模方法

在分子尺度上描述光刻胶的方法是最严格的光刻工艺随机效应建模方法。得克萨斯大学奥斯汀分校的 Grant Willson 团队<sup>[23-25]</sup> 开发了第一个分子光刻胶模型。该模型在三维晶格结构内准确描述了光刻胶的分子成分，如图 10.6 左图所示。采用蒙特卡洛方法仿真分子的动态演化过程（位置、相互作用和反应的变化）。采用临界

电离模型表征光刻胶显影步骤中的溶解度。溶解度的大小取决于聚合物分子链中脱保护位点的数量<sup>[23, 26]</sup>。其他研究小组也研发了类似的分子型模型，来描述表面粗糙度和 LER<sup>[27-30]</sup>。最新的分子光刻胶模型采用了分子动力学（MD）中的有限差分公式<sup>[31]</sup>（见图 10.6 右侧）和粗粒度模型<sup>[32]</sup>。与定向自组装建模中采用的粗粒度模型类似（参见 5.4 节）。

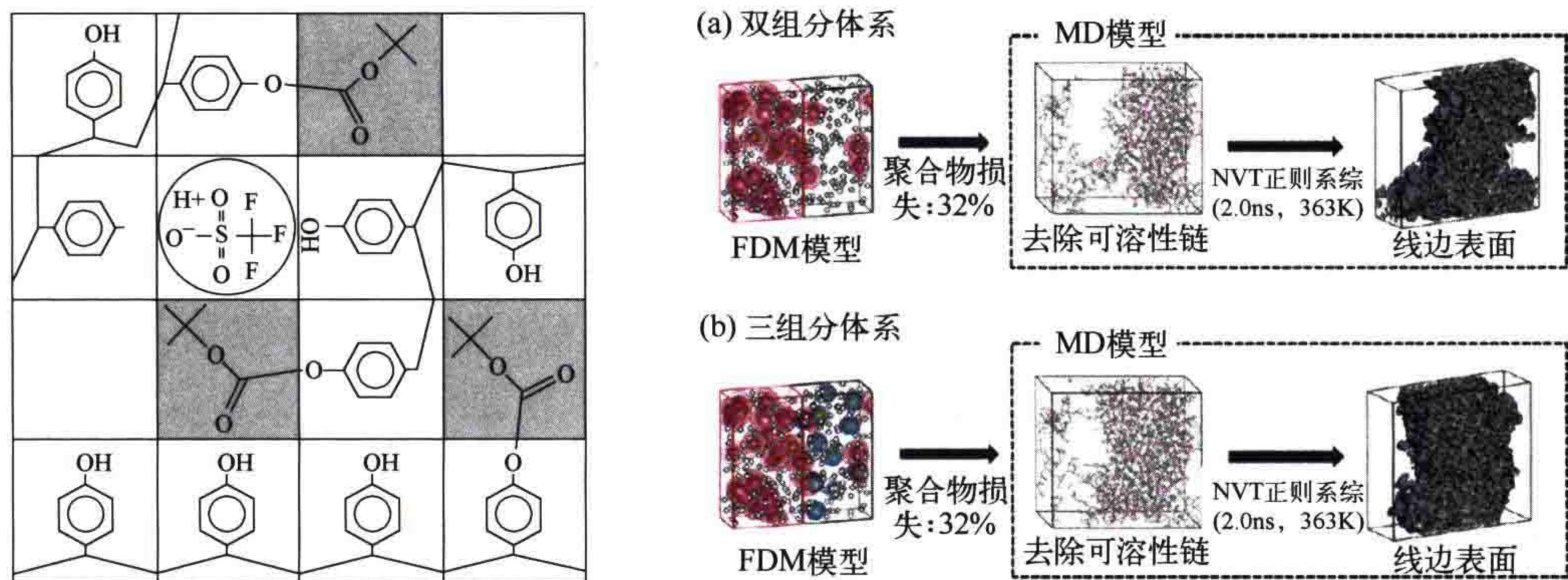


图 10.6 光刻胶随机效应的分子建模方法。左图：第一个分子尺度光刻胶模型描述光刻胶的方法（转载自参考文献 [24]）。右图：最新的分子动力学仿真结果举例，以及无猝灭剂碱时的线边粗糙度（第一行为仅含两种成分的光刻胶）与含猝灭剂碱时的线边粗糙度（第二行为含三种成分的光刻胶）。转载自参考文献 [31]

分子光刻胶模型需要大量的计算资源和光刻胶分子成分信息。这些信息通常难以获得。已有多种不同形式的光刻随机效应模型。虽然它们不那么严格，但仍然可以有效表示（表面粗糙的）光刻胶图形形成过程中的基本物理化学效应。

Mülders 等人<sup>[5]</sup>和 Philippou 等人<sup>[33]</sup>建立了描述分子动力学和扩散概率的主方程，并通过 Gillespie 算法求解这些方程<sup>[34]</sup>。图 10.7 显示了这种模型的典型流程。首先，使用标准连续模型计算给定掩模版图和光学参数下空间像和体像的强度分布。模型中应用了泊松统计，使得光刻胶内吸收光子的分布为离散分布。通过主方程对光酸的产生、耦合动力学行为和扩散现象进行随机效应建模，生成脱保护位点的分布。脱保护反应改变了光刻胶的溶解性，显影后生成边缘粗糙的光刻胶图形。

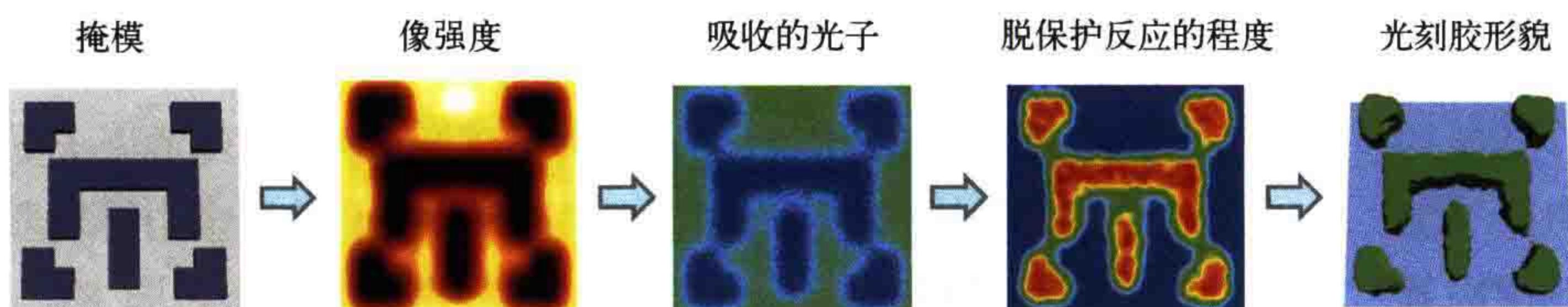


图 10.7 光刻胶随机效应仿真的典型流程。Sentaurus 软件的光刻仿真举例。由新思科技提供

类似的随机模型利用随机变量和概率密度函数描述光刻胶工艺（见 John Biafore 等人<sup>[2, 6]</sup> 和 Mark Smith<sup>[35]</sup> 的论文）。这些方法通过 Smoluchowski 的二元扩散受限反应模型计算化学放大光刻胶 PEB 过程中的扩散受限脱保护反应。可以将该模型形象地描述为一个周围环绕着大量布朗粒子的球体，模型会捕获所有进入球体的粒子<sup>[4]</sup>。

光刻胶随机现象的半经验模型将曝光统计数据与不同的方法相结合，仿真显影过程中的脱保护模糊<sup>[8, 36-38]</sup> 和分形表面的缩放行为<sup>[39]</sup>。尽管不那么严格，但这些公式、抽象计数模型<sup>[40]</sup> 和相关器<sup>[21]</sup> 可以有效表征 LER、LCDU 和随机缺陷与光刻工艺 / 光刻胶参数的关系。下一节将讨论实现微缩需要满足的关系。

随机模型采用不同的方法将光子、化学成分等的概率分布转化为光刻评价参数 (CD、NOK 等)。典型的输入变量符合泊松统计规律。可以用高斯分布描述它们。然而，光刻工艺的非线性会导致评价参数的不对称分布，如图 10.8 中所示，图片改编自 Robert Bristol 和 Marie Krysak<sup>[41]</sup> 的论文。

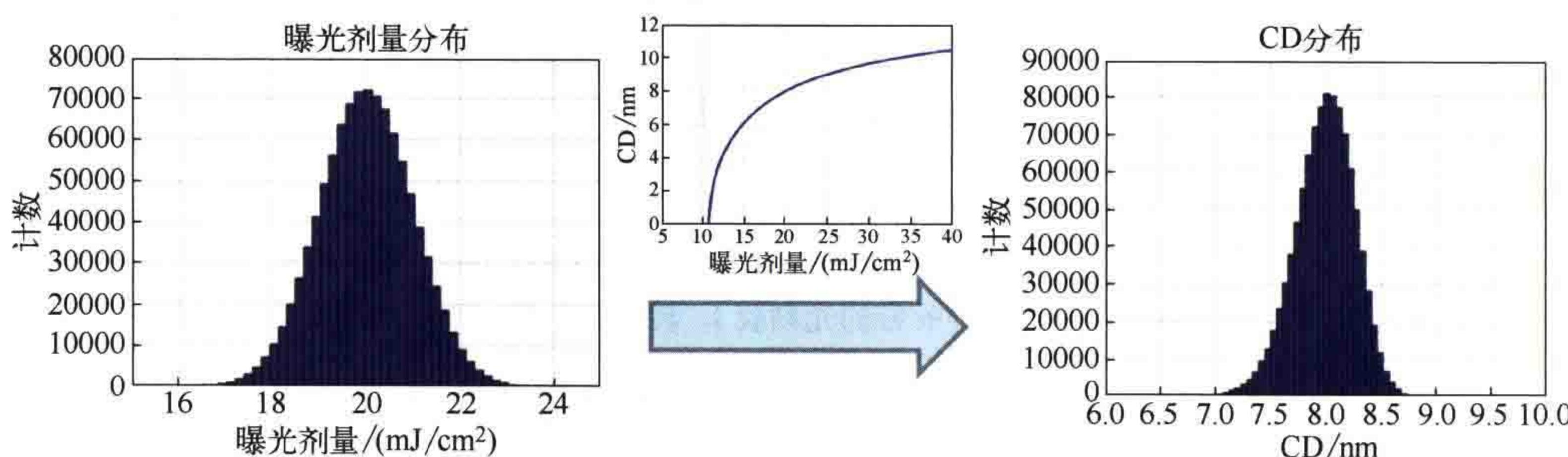


图 10.8 高斯分布的曝光剂量 (左) 转换为不对称 CD 分布 (右)。8nm 孤立沟道图形的 EUV 光刻工艺仿真。采用了仿真的特征转换器 (中)。为显示文中所述效应，EUV 光刻工艺采用了高数值孔径 EUV 光刻机。转载自参考文献 [41]

图 10.8 显示了满足高斯分布的曝光剂量转换为 CD 分布的过程。左侧曝光剂量分布的中心为  $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ ，标准差为  $1\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。中图为 CD 与曝光剂量之间的关系。该关系是对 8nm 孤立沟槽图形的高 NA 极紫外光刻工艺进行仿真分析得出的结论。右图 CD 分布左右两侧的尾部数据看起来有差别。这种不对称性提高了曲线左侧“肥尾巴”处出现小 CD 值的可能性<sup>[15]</sup>。利用 CD 分布的尾部数据可以更有效地预测缺陷<sup>[42]</sup>。尽管图中未直接显示相应的信息，但出现致命缺陷或宽度小于临界值的沟槽的可能性很小。

## 10.4 内在联系与影响

通过对 LER 和其他随机现象进行建模和实验研究，揭示了先进光刻技术中一

些物理量之间的关系，发现了一些新的现象和规律。这些关系和新发现不仅为工艺和材料的优化提供了有价值的信息，而且对半导体光刻技术的未来产生了重要影响。

最明显的比例关系产生自光子噪声，如式（10.4）所示。该式表示线边粗糙度  $\sigma_{LER}$  与曝光剂量  $D$  的关系，即与  $1/\sqrt{D}$  成比例。但是，通过增大曝光剂量降低 LER 的难度很大。在光刻胶和工艺一定的情况下，增加曝光剂量将改变 CD 值。为获得目标 CD，需要对光刻胶进行改性，例如在光刻胶中添加碱作为猝灭剂。因为提高曝光剂量需要增大光源功率或者降低产率，所以无限地提高曝光剂量也是不可行的。比例关系  $1/\sqrt{D}$  决定了即使在大曝光剂量情况下，线边粗糙度也不能达到 0。光刻胶的化学噪声和相应的工艺也会影响 LER。

可以通过提高光刻胶对光的吸收能力和增加光刻胶吸收的光子数量来减少光子噪声对 LER 的影响。例如，通过添加金属纳米颗粒<sup>[43]</sup> 或金属盐<sup>[44]</sup>，或使用氟化聚合物<sup>[45]</sup>，可以提高光刻胶的吸收能力。

光学方面，影响 LER 的第二个因素是成像质量。许多理论研究结果表明 LER 将随着  $1/NILS$  的减小而减小<sup>[36, 46-48]</sup>。这种关系非常直观，因为较大的像斜率将减小曝光和未曝光光刻胶之间过渡区域的宽度。这一区域即是光刻胶边缘区域。实际上， $1/NILS$  的关系式并不是在所有情况下都满足。Steve Hansen 分析了大量 LER 仿真数据。利用公式  $\sigma_{LER}=a(NILS)^b$  对化学放大光刻胶模型产生的 LER 数据进行拟合，得到参数  $b \approx -0.77$ 。对化学放大光刻胶（含光漂白猝灭剂）的建模结果和 Peter De Bisschop 的实验数据<sup>[22]</sup> 表现出了不同的行为。

导致化学噪声的其他重要因素还包括单位体积内的分子数和分子大小。添加猝灭剂碱<sup>[48]</sup>（增大 PAG 的负载）可以减小 LER。这是 PAG 和猝灭剂分子数量符合泊松统计的直接结果。此外，增大猝灭剂的负载需要更大的曝光剂量，减少了光子噪声的影响。LER 还取决于光刻胶聚合物的体积。然而，与扩散类似，也不存在特有的规律。较大的聚合物增加了光刻胶材料的粒度，可以提高 LER。另一方面，分子更大的聚合物有将电离基团的波动进行平均的趋势<sup>[33]</sup>。利用基于杯芳烃衍生物的分子光刻胶可以减小分子大小，有多种方案可供选择<sup>[49]</sup>。

Danilo De Simone 等人<sup>[50]</sup> 的一篇综述文章概述了现有化学放大光刻胶材料的改性方法和新型 EUV 光刻胶材料。具有应用前景的材料包括金属光刻胶（MCR）等。这些材料由金属氧化物 / 有机颗粒组成，不添加任何其他分子成分。MCR 表现出了与 CAR 同样优秀的光刻性能（请见对这些材料的仿真结果<sup>[51-53]</sup>）。具有应用前景的新型 EUV 光刻胶还有多触发光刻胶<sup>[54]</sup> 与光敏化学放大光刻胶（PSCAR）<sup>[55]</sup> 等。

掩模是影响 LER 的另一个因素。掩模吸收层的粗糙边缘在频域被成像系统滤

除。掩模多层膜的重复性粗糙度会引起散斑<sup>[57, 58]</sup>。对最先进 EUV 掩模和工艺的实验研究表明，与光刻胶和光子噪声相比，掩模引起的 LER 很小<sup>[59]</sup>。

Greg Gallatin 总结出 LER、灵敏度和分辨率之间存在如下重要关系：

$$\sigma_{LER}^2 \times D \times blur^3 = \text{常数} \quad (10.8)$$

上式表明，很难获得同时具备低 LER、高灵敏度（即低剂量）和高分辨率（即低模糊，blur）的光刻胶材料。分辨率 - LER - 灵敏度 (RLS) 之间的不确定关系如图 10.9 所示。

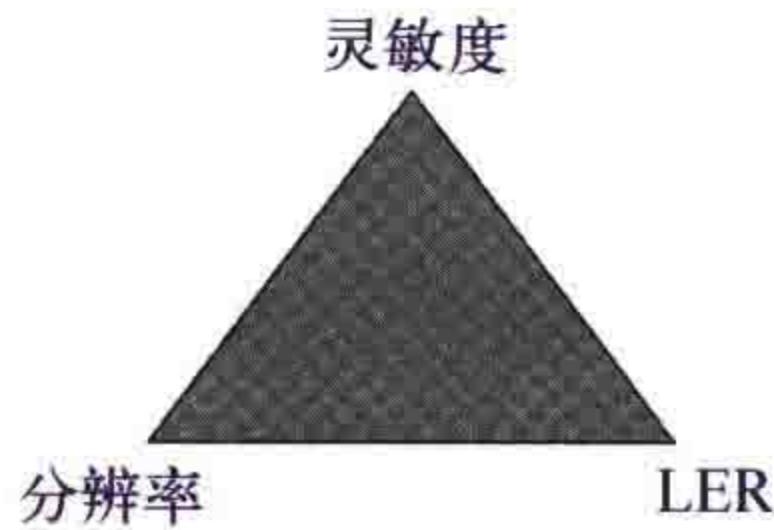


图 10.9 分辨率、线边粗糙度 (LER) 与灵敏度之间的不确定关系 (RLS 不确定关系)

David Van Steenwinckel 等人<sup>[60]</sup> 提出了光刻不确定性法则 (LUP)，作为光刻胶性能的单一评价指标：

$$K_{LUP} = \sqrt{\frac{D_s}{hv}} D_l \sigma_{LER} \frac{L_d^{3/2}}{p} \quad (10.9)$$

式中， $D_s$  和  $D_l$  分别是可产生目标 CD 的曝光剂量以及曝光裕度；其他参数是光子能量  $hv$ 、酸扩散长度  $L_d$  和图形周期  $p$ 。Steenwinkel 等人测量了几种 DUV 光刻 CAR 的特征  $K_{LUP}$  值，并证明了  $K_{LUP}$  几乎与像对比度和 PAG/猝灭剂的负载无关，它仅取决于光刻胶的吸收率与量子效率。

Bernd Geh<sup>[61]</sup> 提出了一种方法，概括了 LER 对 LCDU 的影响，如下式所示，其中  $k_4$  为技术因子：

$$LCDU = k_4 \frac{1}{NILS} \sqrt{\frac{hv}{D}} \quad (10.10)$$

Jara Santaclara 等人<sup>[62]</sup> 对这种方法进行了扩展，增加了特定周期  $p$  下的光刻胶模糊效应：

$$LCDU = k_4 \exp\left(\frac{\sqrt{2\pi}\sigma_{blur}}{p}\right)^2 \sqrt{\frac{hv}{D_{thr}}} \times \frac{1}{ILS} \quad (10.11)$$

式中，像对数斜率 (ILS) 代表了来自光学方面的贡献，其他部分代表了给定  $D_{thr}$  (可将光刻胶完全移除的曝光剂量) 和高斯模糊宽度  $\sigma_{blur}$  情况下光刻胶对 LCDU 的贡献。

对随机现象的分析表明，在不降低分辨率或提高剂量要求的情况下，LER 或 LCDU 可以改善的空间有限。除了对光刻胶材料进行修改之外，还提出了几种后处理技术来减少光刻工艺之后的 LER<sup>[22, 63]</sup>。刻蚀可以去除 LER 的高空间频率成分<sup>[28]</sup>。选择适当的有机底层材料，可能有助于减少 LER 的低空间频率成分<sup>[64]</sup>。为了在未来光刻技术中实现足够低的 LER，还需要进行大量的材料和工艺研究。随机效应对分辨率的影响表现为线边粗糙度，是对光刻分辨率的最基本限制<sup>[1]</sup>。

## 10.5 总结

光子噪声和化学噪声，即小体积中化学成分含量的波动，引起了半导体光刻中的随机效应。随机效应导致了光刻胶图形的粗糙度、特征尺寸的局部变化（LCDU）以及随机缺陷。特征尺寸小于 20nm 时，随机效应变得越来越重要。由于 EUV 光子的能量更高，EUV 光刻对随机效应更敏感。各种建模方法和大量高质量的实验数据有助于解释相关现象，有助于建立描述随机效应与光刻工艺参数之间的比例关系。

进一步提高半导体光刻的分辨率需要大曝光剂量、高图像对比度（NILS）、吸收率更高的新型（低灵敏度）光刻胶材料，以及包含了后处理技术和刻蚀的综合工艺优化技术。

## 参 考 文 献

- [1] C. A. Mack, “Line-edge roughness and the ultimate limits of lithography,” *Proc. SPIE* **7639**, 763931, 2010.
- [2] J. J. Biafore, M. D. Smith, C. A. Mack, J. W. Thackeray, R. Gronheid, S. A. Robertson, T. Graves, and D. Blankenship, “Statistical simulation of photoresists at EUV and ArF,” *Proc. SPIE* **7273**, 727343, 2009.
- [3] A. R. Neureuther and C. G. Willson, “Reduction in x-ray lithography shot noise exposure limit by dissolution phenomena,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **6**(1), 167–173, 1988.
- [4] J. J. Biafore, M. D. Smith, D. Blankenship, S. A. Robertson, E. van Setten, T. Wallow, Y. Deng, and P. Naulleau, “Resist pattern prediction at EUV,” *Proc. SPIE* **7636**, 76360R, 2010.
- [5] T. Mülders, W. Henke, K. Elian, C. Nölscher, and M. Sebald, “New stochastic post-exposure bake simulation method,” *J. Micro/Nano-lithogr. MEMS MOEMS* **4**(4), 43010, 2005.
- [6] J. J. Biafore, M. D. Smith, S. A. Robertson, and T. Graves,

- “Mechanistic simulation of line-edge roughness,” *Proc. SPIE* **6519**, 65190Y, 2007.
- [7] P. Naulleau and G. Gallatin, “Defining and measuring development rates for a stochastic resist: A simulation study,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 041015, 2018.
- [8] C. A. Mack, “A simple model of line edge roughness,” *Future Fab International* **34**, 2010.
- [9] C. A. Mack, “Defining and measuring development rates for a stochastic resist: A simulation study,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **12**(3), 33006, 2013.
- [10] N. G. Orji, T. V. Vorburger, J. Fu, R. G. Dixson, C. V. Nguyen, and J. Raja, “Line edge roughness metrology using atomic force microscopes,” *Meas. Sci. Technol.* **16**(11), 2147–2154, 2005.
- [11] D. J. Dixit, S. O’Mullane, S. Sunkoju, A. Gottipati, E. R. Hosler, V. K. Kamineni, M. E. Preil, N. Keller, J. Race, G. R. Muthinti, and A. C. Diebold, “Sensitivity analysis and line edge roughness determination of 28-nm pitch silicon fins using Mueller matrix spectroscopic ellipsometry-based optical critical dimension metrology,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **14**(3), 031208, 2015.
- [12] V. Constantoudis, G. P. Patsis, A. Tserepi, and E. Gogolides, “Quantification of line-edge roughness of photoresists. II. Scaling and fractal analysis and the best roughness descriptors,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **21**, 1019, 2003.
- [13] V. Constantoudis, G. P. Patsis, L. H. A. Leunissen, and E. Gogolides, “Line edge roughness and critical dimension variation: Fractal characterization and comparison using model functions,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **22**, 1974, 2004.
- [14] C. A. Mack, “Reducing roughness in extreme ultraviolet lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 041006, 2018.
- [15] T. A. Brunner, X. Chen, A. Gabor, C. Higgins, L. Sun, and C. A. Mack, “Line-edge roughness performance targets for EUV lithography,” *Proc. SPIE* **10143**, 101430E, 2017.
- [16] V. Constantoudis, V.-K. M. Kuppuswamy, and E. Gogolides, “Effects of image noise on contact edge roughness and critical dimension uniformity measurement in synthesized scanning electron microscope images,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **12**(1), 13005, 2013.
- [17] V. Constantoudis, G. Papaveros, G. Lorusso, V. Rutigliani, F. V. Roey, and E. Gogolides, “Line edge roughness metrology: Recent challenges and advances toward more complete and accurate measurements,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 041014, 2018.
- [18] G. F. Lorusso, V. Rutigliani, F. V. Roey, and C. A. Mack, “Unbiased roughness measurements: Subtracting out SEM effects,” *Microelectron. Eng.* **190**, 33–37, 2018.

- [19] V. Constantoudis, E. Gogolides, and G. P. Patsis, “Sidewall roughness in nanolithography: Origins, metrology and device effects,” in *Nanolithography*, M. Feldman, Ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 503–537, 2014.
- [20] C. A. Mack, “Generating random rough edges, surfaces, and volumes,” *Appl. Opt.* **52**(7), 1472–1480, 2013.
- [21] P. De Bisschop, “Stochastic printing failures in EUV lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 41011, 2018.
- [22] P. De Bisschop, “Stochastic effects in EUV lithography: Random, local CD variability, and printing failures,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **16**(4), 041013, 2017.
- [23] L. W. Flanagin, V. K. Singh, and C. G. Willson, “Molecular model of phenolic polymer dissolution in photolithography,” *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* **37**, 2103–2113, 1999.
- [24] G. M. Schmid, V. K. Singh, L. W. Flanagin, M. D. Stewart, S. D. Burns, and C. G. Willson, “Recent advances in a molecular level lithography simulation,” *Proc. SPIE* **3999**, 675–685, 2000.
- [25] G. M. Schmid, M. D. Stewart, S. D. Burns, and C. G. Willson, “Mesoscale Monte Carlo simulation of photoresist processing,” *J. Electrochem. Soc.* **151**, G155–G161, 2004.
- [26] P. C. Tsiartas, L. W. Flanagin, C. L. Henderson, W. D. Hinsberg, I. C. Sanchez, R. T. Bonnecaze, and C. G. Willson, “The mechanism of phenolic polymer dissolution: A new perspective,” *Macromolecules* **30**, 4656–4664, 1997.
- [27] G. P. Patsis and E. Gogolides, “Simulation of surface and line-edge roughness formation in resists,” *Microelectron. Eng.* **57–58**, 563–569, 2001.
- [28] D. Drygianakis, M. D. Nijkerk, G. P. Patsis, G. Kokkoris, I. Raptis, L. H. A. Leunissen, and E. Gogolides, “Simulation of the combined effects of polymer size, acid diffusion length and EUV secondary electron blur on resist line-edge roughness,” *Proc. SPIE* **6519**, 65193T, 2007.
- [29] R. A. Lawson and C. L. Henderson, “Mesoscale kinetic Monte Carlo simulations of molecular resists: The effect of PAG homogeneity on resolution, LER, and sensitivity,” *Proc. SPIE* **7273**, 727341, 2009.
- [30] P. J. Rodriguez-Canto, U. Nickel, and R. Abargues, “Understanding acid reaction and diffusion in chemically amplified photoresists: An approach at the molecular level,” *J. Phys. Chem. C* **115**, 20367, 2011.
- [31] H. Lee, M. Kim, J. Moon, S. Park, B. Lee, C. Jeong, and M. Cho, “Multiscale approach for modeling EUV patterning of chemically amplified resist,” *Proc. SPIE* **10960**, 1096008, 2019.
- [32] J. Park, S.-G. Lee, Y. Vesters, J. Severi, M. Kim, D. De Simone, H.-K. Oh, and S.-M. Hur, “Molecular modeling of EUV photoresist revealing the effect of chain conformation on line-edge roughness

- formation," *Polymers* **11**(12), 2019.
- [33] A. Philippou, T. Mülders, and E. Schöll, "Impact of photoresist composition and polymer chain length on line edge roughness probed with a stochastic simulator," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **6**(4), 43005, 2007.
  - [34] D. T. Gillespie, "Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions," *J. Phys. Chem.* **81**(25), 2340–2361, 1977.
  - [35] M. D. Smith, "Mechanistic model of line edge roughness," *Proc. SPIE* **6153**, 61530X, 2006.
  - [36] G. M. Gallatin, "Resist blur and line edge roughness," *Proc. SPIE* **5754**, 38–52, 2005.
  - [37] G. M. Gallatin, P. Naulleau, D. Niakoula, R. Brainard, E. Hassanein, R. Matyi, J. Thackeray, K. Spear, and K. Dean, "Resolution, LER, and sensitivity limitations of photoresists," *Proc. SPIE* **6921**, 69211E, 2008.
  - [38] A. Saeki, T. Kozawa, and S. Tagawa, "Relationship between resolution, line edge roughness, and sensitivity in chemically amplified resist of post-optical lithography revealed by Monte Carlo and dissolution simulations," *Appl. Phys. Express* **2**(7), 75006, 2009.
  - [39] C. A. Mack, "Stochastic modeling of photoresist development in two and three dimensions," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **9**(4), 41202, 2010.
  - [40] S. G. Hansen, "Photoresist and stochastic modeling," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(1), 013506, 2018.
  - [41] R. L. Bristol and M. E. Krysak, "Lithographic stochastics: Beyond 3sigma," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **16**(2), 23505, 2017.
  - [42] M. J. Maslow, H. Yaegashi, A. Frommhold, G. Schiffelers, F. Wahlisch, G. Rispens, B. Slachter, K. Yoshida, A. Hara, N. Oikawa, A. Pathak, D. Cerbu, E. Hendrickx, and J. Bekaert, "Impact of local variability on defect-aware process windows," *Proc. SPIE* **10957**, 109570H, 2019.
  - [43] M. Krysak, M. Trikeriotis, E. Schwartz, N. Lafferty, P. Xie, B. Smith, P. Zimmerman, W. Montgomery, E. Giannelis, and C. K. Ober, "Development of an inorganic nanoparticle photoresist for EUV, ebeam and 193 nm lithography," *Proc. SPIE* **7972**, 79721C, 2011.
  - [44] Y. Vesters, J. Jiang, H. Yamamoto, D. De Simone, T. Kozawa, S. D. Gendt, and G. Vandenberghe, "Sensitizers in extreme ultraviolet chemically amplified resists: Mechanism of sensitivity improvement," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 043506, 2018.
  - [45] H. Yamamoto, T. Kozawa, S. Tagawa, H. Yukawa, M. Sato, and J. Onodera, "Enhancement of acid production in chemically amplified resist for extreme ultraviolet lithography," *Appl. Phys. Express* **1**, 47001, 2008.
  - [46] H. Fukuda, "Analysis of line edge roughness using probability process model for chemically amplified resists," *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**(6S), 3748, 2003.

- [47] J. L. Cobb, F. A. Houle, and G. M. Gallatin, "Estimated impact of shot noise in extreme-ultraviolet lithography," *Proc. SPIE* **5037**, 397, 2003.
- [48] R. L. Brainard, P. Trefonas, C. A. Cutler, J. F. Mackevich, A. Trefonas, S. A. Robertson, and J. H. Lammers, "Shot noise, LER, and quantum efficiency of EUV photoresists," *Proc. SPIE* **5374**, 74, 2004.
- [49] H. Oizumi, T. Kumise, and T. Itani, "Development of new negative-tone molecular resists based on calixarene for EUV lithography," *J. Photopolym. Sci. Technol.* **21**, 443, 2008.
- [50] D. De Simone, Y. Vesters, and G. Vandenberghe, "Photoresists in extreme ultraviolet lithography (EUVL)," *Adv. Opt. Technol.* **6**, 163–172, 2017.
- [51] A. V. Pret, M. Kocsis, D. De Simone, G. Vandenberghe, J. Stowers, A. Giglia, P. de Schepper, A. Mani, and J. J. Biafore, "Characterizing and modeling electrical response to light for metal-based EUV photoresists," *Proc. SPIE* **9779**, 977906, 2016.
- [52] R. Maas, M.-C. van Lare, G. Rispens, and S. F. Wuister, "Stochastics in extreme ultraviolet lithography: Investigating the role of microscopic resist properties for metal-oxide-based resists," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 041003, 2018.
- [53] Z. Belete, A. Erdmann, P. De Bisschop, and U. Welling, "Simulation study for organometallic resists for EUV lithography," in *17th Fraunhofer Lithography Simulation Workshop*, 2019.
- [54] G. O'Callaghan, C. Popescu, A. McClelland, D. Kazazis, J. Roth, W. Theis, Y. Ekinci, and A. P. G. Robinson, "Multi-trigger resist: Novel synthesis improvements for high resolution EUV lithography," *Proc. SPIE* **10960**, 109600C, 2019.
- [55] S. Nagahara, M. Carcasi, G. Shiraishi, H. Nakagawa, S. Dei, T. Shiozawa, K. Nafus, D. De Simone, G. Vandenberghe, H.-J. Stock, B. Küchler, M. Hori, T. Naruoka, T. Nagai, Y. Minekawa, T. Iseki, Y. Kondo, K. Yoshihara, Y. Kamei, M. Tomono, R. Shimada, S. Biesemans, H. Nakashima, P. Fouquet, E. Buitrago, M. Vockenhuber, Y. Ekinci, A. Oshima, and S. Tagawa, "Photosensitized chemically amplified resist (PSCAR) 2.0 for high-throughput and high-resolution EUV lithography: Dual photosensitization of acid generation and quencher decomposition by flood exposure," in *Proc. SPIE* **10146**, 101460G, 2017.
- [56] P. P. Naulleau and G. Gallatin, "Spatial scaling metrics of mask-induced line-edge roughness," *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**(6), 1903, 2008.
- [57] G. M. Gallatin, N. Kita, T. Ujike, and B. Partio, "Residual speckle in a lithographic illumination system," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(4), 430003, 2009.
- [58] O. Noordman, A. Tychkov, J. Baselmans, J. Tsacoyeanes, M. Patra, V. Blahnik, and M. Maul, "Speckle in optical lithography and its

- influence on linewidth roughness,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(4), 43002, 2009.
- [59] X. Chen, E. Verduijn, O. Wood, T. A. Brunner, R. Capelli, D. Hellweg, M. Dietzel, and G. Kersteen, “Evaluation of EUV mask impacts on wafer line-width roughness using aerial and SEM image analyses,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 041012, 2018.
- [60] D. V. Steenwinckel, R. Gronheid, F. V. Roey, P. Willems, and J. H. Lammers, “Novel method for characterizing resist performance,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **7**(2), 23002, 2008.
- [61] B. Geh, “EUVL: The natural evolution of optical microlithography,” *Proc. SPIE* **10957**, 1095705, 2019.
- [62] J. G. Santaclara, B. Geh, A. Yen, J. Severi, D. De Simone, G. Rispens, and T. Brunner, “One metric to rule them all: New k<sub>4</sub> definition for photoresist characterization,” *Proc. SPIE* **11323**, 113231A, 2020.
- [63] M. Chandhok, K. Frasure, E. S. Putna, T. R. Younkin, W. Rachmady, U. Shah, and W. Yueh, “Improvement in linewidth roughness by postprocessing,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**(6), 2265–2270, 2008.
- [64] V. Rutigliani, G. F. Lorusso, D. De Simone, F. Lazzarino, G. Papaveros, E. Gogolides, V. Constantoudis, and C. A. Mack, “Setting up a proper power spectral density and autocorrelation analysis for material and process characterization,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 041016, 2018.

# 附录



## 附录 1 名词中英文对照

3D interference lithography: 三维干涉光刻

3D lithography: 三维光刻

3D mask effect: 三维掩模效应

3D microprinting: 三维微打印

5-bar test: 五线测试

### A

Abbe method: 阿贝方法

Abbe-Rayleigh criteria: 阿贝 - 瑞利准则

aberration: 像差

astigmatism: 像散

aberration measurement: 像差测量

coma: 豪差

power aberration: 离焦像差

spherical aberration: 球差

trefoil aberration: 三叶像差

absorbance modulation optical lithography (AMOL): 吸收度调制光刻

address grid: 寻址网格

Airy disk: 艾里斑

alternating PSM (AltPSM): 交替型相移掩模

anamorphic len: 变形物镜

annular illumination: 环形照明

antireflective coating: 抗反射涂层

Arrhenius dependency: 阿伦尼乌斯公式

assist feature: 辅助图形

assist line: 辅助衬线

astigmatism aberration: 像散像差

attenuated PSM (AttPSM): 衰减型相移掩模

## B

bananicity: 香蕉形变

bandwidth: 带宽

BARC: 底部抗反射涂层

beyond EUV lithography (BEUV): 6.x nm 波长 EUV 光刻

black border effect: 黑边效应

bleaching: 漂白

block copolymer: 嵌段共聚物

Bossung curves: Bossung 曲线

bottom antireflective coating (BARC): 底部抗反射涂层

bottom-up nanofabrication: 自下而上的纳米制造

boundary layer model: 边界层模型

box-in-box test: 框套框测试

Bragg's law: 布拉格定理

Brewster angle: 布儒斯特角

bull's eye illumination: 牛眼照明

bump defect: 凸起型缺陷

## C

capping layer: 顶盖层

CAR: 化学放大光刻胶

CARL: 化学放大光刻胶线

CD: 关键尺寸

CD uniformity (CDU): 关键尺寸均匀性

CEL: 对比度增强层

chalcogenide glasses: 硫系玻璃

chemical contrast: 化学对比度

chemical noise: 化学噪声

chemically amplified resist (CAR): 化学放大光刻胶

chemically amplified resist lines: 化学放大光刻胶线

chemoepitaxy: 化学外延法

chief ray angle at the object (CRAO): 物方主光线角

chromeless phase shift lithography (CPL): 无铬相移光刻

chromeless PSM: 无铬相移掩模

circular illumination: 圆形照明

coarse-grained model: 粗粒度模型

coherence: 相干性

    spatial coherence: 空间相干性

    temporal coherence: 时间相干性

coma aberration: 蕈差

compact model: 紧凑型模型

compact resist model: 紧凑型光刻胶模型

contact hole array: 接触孔阵列

contact printing: 接触式光刻

contrast: 对比度

    chemical contrast: 化学对比度

    contrast enhancement layer (CEL): 对比度增强层

    contrast fading: 对比度降低

    image contrast: 成像对比度

    photoresist contrast: 光刻胶对比度

conventional illumination: 传统照明

CPL: 无铬相移掩模

CQuad illumination: 旋转了 45° 的四极照明

CRAO: 物方主光线角

critical dimension (CD): 关键尺寸

critical ionization model: 临界电离模型

cross linking: 交联

cross section: 横截面

cutline: 切线

## D

dark field imaging: 暗场成像

deep-ultraviolet (DUV) lithography: 深紫外光刻

defocus: 离焦

degree of polarization (DoP): 偏振度

demagnification: 缩小倍率

deprotection: 脱保护

depth of focus (DoF): 焦深

DESIRE: 扩散增强硅化光刻胶

development: 显影

puddle development: 旋覆浸没式显影

spray development: 喷洒显影

diazonaphthoquinone (DNQ) photoresist: 重氮萘醌光刻胶

diffraction: 衍射

diffraction angle: 衍射角

diffraction efficiency: 衍射效率

diffraction equation: 衍射公式

diffraction limitation: 衍射受限

diffraction limited imaging: 衍射受限成像

diffraction order: 衍射级

diffraction spectrum: 衍射谱

Fraunhofer diffraction: 夫琅禾费衍射

Fresnel diffraction: 菲涅耳衍射

diffractive optical element (DOE): 衍射光学元件

diffusion: 扩散

diffusion coefficient: 扩散系数

diffusion length: 扩散长度

diffusion enhanced sylilated resist (DESIRE): 扩散增强硅化光刻胶

digital mirror display (DMD): 数字微镜阵列

Dill model: Dill 模型

dipole illumination: 二极照明

directed self-assembly (DSA): 导向自组装

discharge-produced plasma (DPP) source: 放电等离子体 (DPP) 光源

dissolution inhibitor: 溶解抑制剂

DMD: 数字微镜阵列

DNQ photoresist: 重氮萘醌光刻胶

DOE: 衍射光学元件

domain-decomposition technique (DDT): 域分解技术

DoP: 偏振度

dose latitude: 曝光剂量裕度

dose-to-clear: 清除剂量

double exposure: 双重曝光

double patterning: 双重图形技术

DPP source: 放电等离子体光源

DSA: 导向自组装

DTD: 双重显影技术

DUV lithography: 深紫外光刻

dyed photoresist: 染色后的光刻胶

## E

e-beam lithography: 电子束光刻

edge placement error: 边缘放置误差

electromagnetic field simulation: 电磁场仿真

EMF simulation: 电磁场仿真

EPE: 边缘放置误差

EUV lithography: 极紫外光刻

evanescent: 倏逝

evanescent order: 倏逝级次

evanescent wave: 倏逝波

excimer laser: 准分子激光

ArF excimer laser: ArF 准分子激光

F<sub>2</sub> excimer laser: F<sub>2</sub> 准分子激光

KrF excimer laser: KrF 准分子激光

exposure: 曝光

exposure slit: 曝光狭缝

extreme-ultraviolet (EUV) : 极紫外

EUV lithography: 极紫外光刻

EUV light source: 极紫外光源

EUV mask: 极紫外掩模

EUV mask defect: 极紫外掩模缺陷

EUV mask shadowing: 极紫外掩模阴影效应

EUV resist: 极紫外光刻胶

high-NA EUV lithography: 高数值孔径极紫外光刻

## F

fast marching method: 快速行进算法

FDTD: 时域有限差分

FEM: 有限元法

Fickian diffusion: Fickian 扩散

finite element method: 有限元法

finite integral technique: 有限积分技术

finite-difference time-domain (FDTD) method: 时域有限差分方法

FIT: 有限积分技术

flare: 杂散光

FLEX: 焦面裕度增强曝光

flood exposure: 泛曝光

Flory–Huggins parameter: 弗洛里 - 哈金斯参数

FMM: 有限元法

focus drilling: 多焦面曝光技术

focus latitude: 焦面裕度

focus latitude enhancement exposure (FLEX): 焦面裕度增强曝光

footprint: 印迹

Fourier modal method (FMM): 傅里叶模式法

Fourier optics: 傅里叶光学

fraction of polarization: 偏振分数

fragmentation: 分段

Fraunhofer diffraction: 夫琅禾费衍射

free-form illumination: 自由照明

Fresnel: 菲涅耳

Fresnel diffraction: 菲涅耳衍射

Fresnel equations: 菲涅耳公式

Fresnel zone: 菲涅耳区

## G

g-line: g 线

Gillespie algorithm: Gillespie 算法

graphoepitaxy: 制图外延法

grating equation: 光栅方程

grayscale lithography: 灰度光刻

graytone lithography: 灰调光刻

grazing incidence mirror: 掠入射反射镜

guiding pattern: 导向图形

## H

h-line: h 线

hammerhead: 锤头

hardmask: 硬掩模

HEBS: 高能束流敏感

Helmholtz equation: 亥姆霍兹方程

high-energy-beam-sensitive (HEBS) glass: 高能束流敏感型玻璃

holographic lithography: 全息光刻

Hopkins: 霍普金斯

    Hopkins approach: 霍普金斯方法

    Hopkins assumption: 霍普金斯假设条件

    Hopkins imaging equation: 霍普金斯成像公式

    Hopkins method: 霍普金斯方法

horizontal line-space patterns: 水平向线空图形

hotspot: 热点

HSQ: 氢倍半硅氧烷

Huygens–Fresnel principle: 惠更斯 - 菲涅耳原理

hybrid lithography: 混合光刻

hydrogen silsesquioxane (HSQ) photoresist: 氢倍半硅氧烷光刻胶

## I

i-line: i 线

IDEAL: 先进光刻新型双重曝光

illumination: 照明

    annular illumination: 环形照明

    bull's eye illumination: 牛眼照明

circular illumination: 圆形照明

conventional illumination: 传统照明

CQuad illumination: 旋转了  $45^{\circ}$  的四极照明

dipole illumination: 二极照明

free-form illumination: 自由照明

illumination bandwidth: 照明带宽

illumination system: 照明系统

off-axis illumination: 离轴照明

quadrupole illumination: 四极照明

ILT: 反向光刻技术

image: 像

aerial image: 空间像

bulk image: 体像

image field: 像场

image formation: 像的形成

image imbalancing: 成像不对称

image contrast: 成像对比度

immersion lithography: 浸没式光刻

inhibitor: 抑制剂

innovative double exposure by advanced lithography (IDEAL): 先进光刻新型双重曝光

intensity imbalancing: 强度不对称

interference lithography (technology): 干涉光刻 (技术)

interferometric lithography: 干涉光刻

intermediate state two-photon (ISTP) material: 中间态双光子材料

inverse lithography technology (ILT): 反向光刻技术

iso-dense bias: 孤立 - 密集图形成像偏差

## J

Jones pupil: 琼斯光瞳

## K

Kirchhoff: 基尔霍夫

Kirchhoff approach: 基尔霍夫方法

Kirchhoff boundary condition: 基尔霍夫边界条件

Köhler: 科勒

Köhler illumination: 科勒照明

Köhler integrator: 科勒积分器

Kramers-Kronig relation: Kramers-Kronig 关系

## L

Lambert-Beer law: 朗伯 - 比尔定律

laser direct write lithography (LDWL): 激光直写光刻

laser direct write material processing (LDWP): 激光直写材料加工工艺

laser-produced plasma (LPP) source: 激光等离子体光源

LCD: 液晶显示

LDWL: 激光直写光刻

LDWP: 激光直写材料加工工艺

LELE: 光刻 - 刻蚀 - 光刻 - 刻蚀

lensless EUV lithography: 无透镜 EUV 光刻

LER: 线边粗糙度

level-set algorithm: 水平集算法

LFLE: 光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀

light-emitting diode: 发光二极管

light-induced refractive index change: 光致折射率变化

line edge roughness (LER): 线边粗糙度

line width roughness (LWR): 线宽粗糙度

line-end shortening: 线端缩短

line-space pattern: 线空图形

liquid crystal display (LCD): 液晶显示

litho-cure-litho-etch (LCLE): 光刻 - 固化 - 光刻 - 刻蚀

litho-etch-litho-etch (LELE): 光刻 - 刻蚀 - 光刻 - 刻蚀

litho-freeze-litho-etch (LFLE): 光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀

litho-litho-etch (LLE): 光刻 - 光刻 - 刻蚀

Littrow mounting: 利特罗入射条件

LPP source: LPP 光源

lumped parameter model: 集总参数模型

LWR: 线宽粗糙度

**M**

Mack development model: Mack 显影模型

mandrel: 芯轴

mask: 掩模

mask aligner: 掩模对准曝光机

mask defect: 掩模缺陷

mask diffraction analysis: 掩模衍射谱分析

mask 3D effect: 三维掩模效应

mask diffraction spectrum: 掩模衍射谱

mask error enhancement factor (MEEF): 掩模误差增强因子

mask topography effect: 掩模形貌效应

mask-induced aberration: 掩模像差

mask-induced best focus shift: 掩模导致的最佳焦面偏移

mask-induced phase effect: 掩模导致的相位效应

maskless lithography: 无掩模光刻

Maxwell's equations: 麦克斯韦方程组

MEEF: 掩模误差增强因子

mercury lamp: 汞灯

Mo/Si multilayer: Mo/Si 多层膜

silicon multilayer: 硅多层膜

model-based OPC: 基于模型的光学邻近效应修正

molecular dynamical model: 分子动力学模型

molecular photoresist model: 分子光刻胶模型

molybdenum/silicon (Mo/Si) multilayer: 钼硅 (Mo/Si) 多层膜

multi-objective optimization: 多目标优化

multicolor lithography: 多波长光刻

multilayer: 多层膜

multilayer coating: 多层膜镀膜

multilayer defect: 多层膜缺陷

multiple exposure: 多重曝光

multiple patterning: 多重图形

**N**

NA: 数值孔径

nanosphere lithography: 纳米球光刻

near-field lithography: 近场光刻

negative index superlens: 负折射率超透镜

negative tone photoresist: 负性光刻胶, 负胶

NILS: 归一化像对数斜率

NOK: 随机效应的量化评价方法

non-Fickian diffusion: 非 Fickian 扩散系数

non-telecentricity: 非远心性

normalized image log slope (NILS): 归一化像对数斜率

not OK metric for stochastic printing failures: 随机光刻缺陷的 NOK 评价指标

numerical aperture (NA): 数值孔径

## O

off-axis illumination: 离轴照明

OOB: 带外

OPC: 光学邻近效应修正

OPD: 光程差

OPE: 光学邻近效应

optical nonlinearity: 光学非线性

optical path difference (OPD): 光程差

optical proximity correction: 光学邻近效应修正

optical proximity effect: 光学邻近效应

optical proximity effect (OPE) curve: 光学邻近效应曲线

optical threshold material: 光学阈值材料

organically modified ceramic (ORMOCER) microresist: 有机改性陶瓷微纳加工光刻胶

out-of-band (OOB) radiation: 带外辐射

outgassing: 放气

overlay: 套刻精度

## P

PAG: 光酸生成剂

pattern integrated interference lithography: 图形化干涉光刻

pattern multiplication: 图形倍增

pattern rectification: 图形修正

PEB: 曝光后烘焙

pellicle: 掩模保护膜

percolation model: 渗流模型

phase conflicts: 相位冲突

phase shift mask: 相移掩模

alternating phase shift mask: 交替型相移掩模

attenuated phase shift mask: 衰减型相移掩模

chromeless phase shift mask: 无铬相移掩模

strong phase shift mask: 强相移掩模

phase shift mask (PSM): 相移掩模

photoacid: 光酸

photoacid generator (PAG): 光酸生成剂

photoactive component (PAC): 光活性成分

photobase generator: 光碱生成剂

photodoping: 光掺杂

photoisomerization: 光敏化

photomask: 光掩模

photon noise: 光子噪声

photoresist: 光刻胶

classification: 分类

contrast: 对比度

contrast curve: 对比度曲线

development: 显影

polarity: 极性

shrinkage: 收缩

tonality: 色调

photosensitivity: 光敏性

pit defect: 凹陷型缺陷

pitch: 周期

pitch walking: 周期摆动

pixelated mask: 像素化掩模

placement error: 放置误差

PMMA (polymethylmethacrylate): 聚甲基丙烯酸甲酯

photoresist: 光刻胶

Poisson distribution: 泊松分布

polarization: 偏振

    polarization effect: 偏振效应

    polarization illumination: 偏振照明

polymerization: 聚合反应

post-exposure bake (PEB): 曝光后烘焙

power aberration: 离焦像差

power spectral density (PSD): 功率谱密度

pre-bake: 前烘

pre-pulse technology: 预脉冲技术

process: 工艺

    process flow: 工艺流程

    process linearity: 工艺线性度

    process variation (PV) band: 工艺变化带

    process window: 工艺窗口

programmable mask: 可编程掩模

projection: 投影

    projection imaging: 投影成像

    projection len: 投影物镜

    projection scanner: 步进扫描投影光刻机

    projection stepper: 步进重复投影光刻机

    projection system: 投影系统

propagating wave: 传播波

proximity effect: 邻近效应

proximity gap: 邻近间距

proximity printing: 接近式光刻

PS-b-PMMA: 聚苯乙烯 - 聚甲基丙烯酸甲酯嵌段共聚物

PSD: 功率谱密度

pseudo-spectral time-domain (PSTD): 伪谱时域

PSM: 相移掩模

pupil filter: 光瞳滤波

pupil function: 光瞳函数

PV band: PV 带

**Q**

quadrupole illumination: 四极照明  
 quantum imaging: 量子成像  
 quencher: 猝灭剂

**R**

raster scan: 栅格扫描  
 ray tracing: 光线追迹  
 Rayleigh criteria: 瑞利准则  
 RCEL: 可逆对比度增强层  
 RCWA: 严格耦合波分析  
 reduction: 缩小  
 reflective notching: 反光槽  
 resolution: 分辨率  
 reversible contrast enhancement layer (RCEL): 可逆对比度增强层  
 rigorous coupled wave analysis (RCWA): 严格耦合波分析  
 rigorous EMF modeling: 严格电磁场建模  
 RLS trade-off: RLS 平衡  
 roadrunner resist model: RoadRunner 光刻胶模型  
 rule based OPC: 基于规则的 OPC

**S**

SADP: 自对准双重图形技术  
 scanning electron microscopy (SEM): 扫描电子显微镜  
 Schwarzschild optic: 施瓦西物镜  
 SDDP: 间隔层双重图形技术  
 self-aligned double patterning (SADP): 自对准双重图形技术  
 serif: 亚分辨率辅助图形  
 shadowing effect: 阴影效应  
 shrinkage: 收缩  
 sidewall angle: 侧墙倾角  
 SLA: 立体光刻  
 SMO: 光源掩模优化  
 Snell's law: 斯涅耳定律

SOCS: 相干系统叠加

soft X-ray radiation: 软 X 射线辐射

solid immersion lithography: 固体浸没式光刻

source map: 光源图

source mask optimization: 光源掩模优化

spacer-defined double patterning (SDDP): 间隔层双重图形技术

spatial coherence: 空间相干性

spatial frequency: 空间频率

spherical aberration: 球差像差

spin coating: 旋转涂胶

SPP: 表面等离激元

standing-wave pattern: 驻波图

STED: 受激发射损耗

STED inspired lithography: 基于 STED 的光刻技术

STED microscopy: 受激发射损耗显微镜

stereolithography: 立体光刻

stereolithography apparatus: 立体光刻装置

stimulated emission depletion: 受激发射损耗

stochastic printing failure: 随机光刻缺陷

stray light: 杂散光

SU-8 photoresist: SU-8 光刻胶

subresolution assist feature: 亚分辨率辅助图形

sum of coherent systems (SOCS): 相干系统叠加

surface plasmon polariton (SPP): 表面等离激元 (SPP)

swing effect: 摆动效应

## T

Talbot: 泰伯

Talbot displacement lithography: 泰伯位移光刻

Talbot distance: 泰伯距离

Talbot effect: 泰伯效应

Talbot image: 泰伯像

TARC: 顶部抗反射涂层

TE polarization: TE 偏振

technology factor  $k_1$ : 技术因子  $k_1$

telecentricity error: 远心误差

thin film imaging: 薄膜成像

thin mask: 薄掩模

threshold: 阈值

threshold model: 阈值模型

threshold-to-size (THRS): 目标尺寸阈值

TIS: 总积分散射

TM polarization: TM 偏振

tonality: 色调

top antireflective coating (TARC): 顶部抗反射涂层

top-down nanofabrication: 自上而下的纳米制造

top-surface imaging: 上表面成像

total integrated scatter (TIS): 总积分散射

TPA: 双光子吸收

TPP: 双光子聚合

transfer matrix method: 传递矩阵法

transmission cross coefficient (TCC): 交叉传递函数

trefoil aberration: 三叶像差

trim exposure: 修剪曝光

trim mask: 修剪掩模

TSI: 上表面成像

two-photon absorption (TPA): 双光子吸收

two-photon polymerization: 双光子聚合

## U

underlayer: 底膜

## V

variable threshold model: 变阈值模型

vector scan: 矢量扫描

vertical line-space pattern: 垂向线空图形

**W**

wafer topography effect: 硅片形貌效应

wafer track: 硅片涂胶显影机

wave: 波

    wave aberration: 波像差

    wave vector: 波矢量

wavefront tilt: 波前倾斜

waveguide: 波导

    waveguide method: 波导法

    waveguide order: 波导级次

Weiss rate model: Weiss 速率模型

Wolff rearrangement: 沃尔夫重排

**X**

X-ray proximity lithography: X 射线接近式光刻

**Z**

Zernike polynomial: 泽尼克多项式

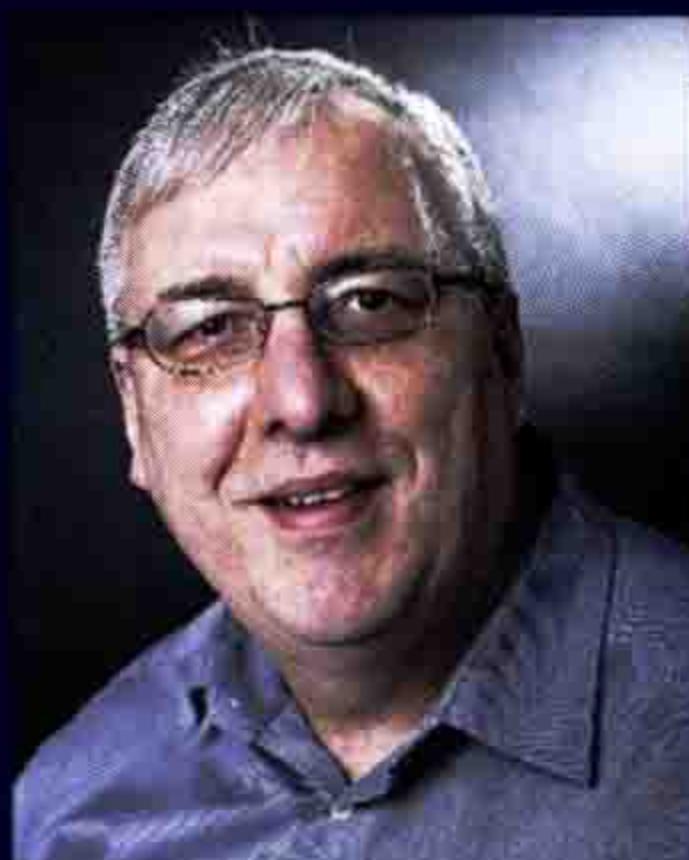
## 附录 2 缩略语中英文对照

1D	one-dimensional	一维
2D	two-dimensional	二维
3D	three-dimensional	三维
AFM	atomic force microscopy	原子力显微镜
AIMS™	Aerial Image Measurement System (Zeiss)	空间像测量装置(Zeiss)
AltPSM	alternating PSM	交替型相移掩模
AMOL	absorbance modulation optical lithography	吸收度调制光刻
AttPSM	attenuated PSM	衰减型相移掩模
BARC	bottom antireflective coating	底部抗反射涂层
CAR	chemically amplified resist	化学放大光刻胶
CD	critical dimension	关键尺寸
CEL	contrast enhancement layer	对比度增强层

CPL	chromeless phase shift lithography 无铬相移光刻
CPU	central processing unit 中央处理器
CQuad	cross-polarized quadrupole with poles along $x$ and $y$ 旋转了 45° 的四极照明，照明极在 $x$ 、 $y$ 轴上
CRAO	chief ray angle at object 物方主光线角
CVD	chemical vapor deposition 化学气相沉积
DMD	digital mirror display 数字微镜阵列
DNQ	diazonaphthoquinone 重氮萘醌
DOE	diffractive optical element 衍射光学元件
DoF	depth of focus 焦深
DoP	degree of polarization 偏振度
DPP	discharge-produced plasma 放电等离子体
DSA	directed self-assembly 导向自组装
DTD	dual-tone development 双重显影技术
DUV	deep-ultraviolet 深紫外
EMF	electromagnetic field 电磁场
EPE	edge placement error 边缘放置误差
EUV	extreme-ultraviolet 极紫外
FDTD	finite-difference time-domain 时域有限差分
FEM	finite-element method 有限元法
FIT	finite-integral technique 有限积分技术
FLEX	focus-latitude enhancement exposure 焦面裕度增强曝光
FMM	Fourier modal method 傅里叶模式法
FWHM	full width at half maximum 半高全宽
HEBS	high-energy-beam-sensitive (glass) 高能束流敏感型玻璃
HMDS	hexamethyldisilazane 六甲基二硅氮烷
HSQ	hydrogen silesquioxane 氢倍半硅氧烷
IDEAL	innovative double exposure by advanced lithography 先进光刻新型双重曝光
ILT	inverse lithography technology 反向光刻技术
ISTP	intermediate-state two-photon (material) 中间态双光子（材料）
LCD	liquid crystal display 液晶显示
LDWL	laser direct-write lithography 激光直写光刻
LDWP	laser direct-write material processing 激光直写材料加工工艺

LED	light-emitting diode	发光二极管
LELE	litho-etch-litho-etch	光刻 - 刻蚀 - 光刻 - 刻蚀
LER	line edge roughness	线边粗糙度
LFLE	litho-freeze-litho-etch	光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀
LPP	laser-produced plasma	激光等离子体
LW	linewidth	线宽
LWR	linewidth roughness	线宽粗糙度
MEEF	mask error enhancement factor	掩模误差增强因子
MEMS	micro-electro-mechanical system	微机电系统
Mo/Si	molybdenum silicon multilayer for EUV mask blanks	用于 EUV 掩模白板的钼硅多层膜
MoSi	molybdenum silicon alloy for DUV mask absorbers	用于 DUV 掩 模吸收层的钼硅合金
NA	numerical aperture	数值孔径
NILS	normalized image log slope	归一化像对数斜率
NTD	negative-tone development	负显影
OAI	off-axis illumination	离轴照明
OMOG	opaque MoSi on glass	不透明 MoSi- 玻璃掩模
OOB	out-of-band (radiation)	带外 (辐射)
OPC	optical proximity correction	光学邻近效应修正
OPD	optical path difference	光程差
ORMOCER	organically modified ceramic (microresist)	有机改性陶瓷 (微纳 加工光刻胶)
PAC	photoactive component	光活性成分
PAG	photoacid generator	光酸生成剂
PEB	post-exposure bake	曝光后烘培
PS- <i>b</i> -PMMA	polystyrene-block-poly (methyl methacrylate)	聚苯乙烯 - 聚甲基 丙烯酸甲酯嵌段共聚物
PSD	power spectral density	功率谱密度
PSM	phase shift mask	相移掩模
PTD	positive-tone development	正显影
PV	process variation	工艺变化
RCEL	reversible contrast enhancement layer	可逆对比度增强层
RCWA	rigorous coupled-wave analysis	严格耦合波分析

RMS	root mean square (error) 均方根(误差)
SADP	self-aligned double patterning 自对准双重图形技术
SEM	scanning electron microscope 扫描电子显微镜
SMO	source mask optimization 光源掩模优化
SOCS	sum of coherent systems 相干系统叠加
SPP	surface plasmon polariton 表面等离激元
STED	stimulated emission depletion 受激发射损耗
TARC	top antireflective coating 顶部抗反射涂层
TCC	transmission cross coefficient 交叉传递函数
TE	transverse electric 横向电场
THR	threshold 阈值
THRS	threshold-to-size 目标尺寸阈值
TIS	total integrated scatter 总积分散射
TM	transverse magnetic 横向磁场
TPA	two-photon absorption 双光子吸收
TPP	two-photon polymerization 双光子聚合
TSI	top-surface imaging 上表面成像
UV	ultraviolet 紫外
VTRM	variable-threshold resist model 变阈值光刻胶模型



### 作者简介 | 安德里亚斯·爱德曼

国际光学工程学会（SPIE）会士，德国弗劳恩霍夫（Fraunhofer）协会系统集成与元件研究所计算光刻和光学组学术带头人，德国埃尔朗根-纽伦堡大学客座教授。拥有25年以上光学光刻与极紫外光刻研发经验。多次担任国际光学工程学会光学光刻与光学设计国际会议主席，是Fraunhofer国际光刻仿真技术研讨会组织者。为Dr.LiTHO等多款先进光刻仿真软件的研发与发展做出了重要贡献。



### 译者简介 | 李思坤

中国科学院上海光学精密机械研究所研究员，博士生导师。长期从事半导体光学光刻与极紫外光刻技术研究，主持多项国家科技重大专项、张江实验室、国家自然科学基金、上海市自然科学基金项目/课题/子课题，发表SCI/EI检索学术论文110余篇，获授权发明专利40余项，多项专利已转移至国内集成电路制造装备与软件生产企业，合著出版学术专著2部，参与编著我国首部全工具链《EDA技术白皮书》，多次受邀作国内外邀请/特邀学术报告。

# 半导体先进光刻 理论与技术

Optical and EUV Lithography:  
A Modeling Perspective

销售分类建议：半导体/光刻

ISBN 978-7-122-43276-6



定价：198.00元

Authorized Chinese-language edition