

- [12] W. Leung, A. R. Neureuther, and W. G. Oldham, “Inorganic resist phenomena and their applications to projection lithography,” *IEEE Trans. Electron Devices* **33**, 173–181, 1986.
- [13] A. Reiser, *Photoactive Polymers: The Science and Technology of Resists*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [14] H. Steppan, G. Buhr, and H. Vollmann, “The resist technique: A chemical contribution to electronics,” *Angewandte Chemie International Edition in English* **21**(7), 455–469, 1982.
- [15] R. R. Kunz, R. D. Allen, W. D. Hinsberg, and G. M. Wallraff, “Acid-catalyzed single-layer resists for ArF lithography,” *Proc. SPIE* **1925**, 167, 1993.
- [16] U. Okoroanyanwu, T. Shimokawa, J. Byers, and C. G. Willson, “Alicyclic polymers for 193 nm resist applications: Synthesis and characterization,” *Chem. Mater.* **10**, 3319–3327, 1998.
- [17] U. Okoroanyanwu, J. Byers, T. Shimokawa, and C. G. Willson, “Alicyclic polymers for 193 nm resist applications: Lithographic evaluation,” *Chem. Mater.* **10**, 3328–3333, 1998.
- [18] R. Medeiros, A. Aviram, C. R. Guarnieri, W.-S. Huang, R. Kwong, C. K. Magg, A. P. Mahorowala, W. M. Moreau, K. E. Petrillo, and M. Angelopoulos, “Recent progress in electron-beam resists for advanced mask-making,” *IBM J. Res. Dev.* **45**, 639, 2001.
- [19] H. Ito, G. Breyta, D. Hofer, R. Sooriyakumaran, K. Petrillo, and D. Seeger, “Environmentally stable chemical amplification positive resist: Principle, chemistry, contamination resistance, and lithographic feasibility,” *J. Photopolym. Sci. Technol.* **7**, 433–448, 1994.
- [20] C. A. Mack, *Fundamental Principles of Optical Lithography*, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [21] C. A. Mack, A. Stephanakis, and R. Hershel, “Lumped parameter model of the photolithographic process,” in *Kodak Microelectronics Seminar, Interface*, 228–238, 1986.
- [22] C. A. Mack, “Enhanced lumped parameter model for photolithography,” *Proc. SPIE* **2197**, 501, 1994.
- [23] J. L. Sturtevant, W. Conley, and S. E. Webber, “Photosensitization in dyed and undyed APEX-E DUV resist,” *Proc. SPIE* **2724**, 273–286, 1996.
- [24] F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge, and J. M. Shaw, “Characterization of positive photoresist,” *IEEE Trans. Electron Devices* **22**, 445, 1975.
- [25] T. Kozawa, “Optimum concentration ratio of photodecomposable quencher to acid generator in chemically amplified extreme ultraviolet resists,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**(12), 126501, 2015.
- [26] S. G. Hansen, “Photoresist and stochastic modeling,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(1), 013506, 2018.

- [27] C. L. Henderson, *Advances in Photoresist Characterization and Lithography Simulation*. PhD thesis, University of Texas at Austin, 1998.
- [28] A. Erdmann, C. L. Henderson, and C. G. Willson, “The impact of exposure induced refractive index changes of photoresists on the photolithographic process,” *J. Appl. Phys.* **89**, 8163, 2001.
- [29] S. Liu, J. Du, X. Duan, B. Luo, X. Tang, Y. Guo, Z. Cui, C. Du, and J. Yao, “Enhanced Dill exposure model for thick photoresist lithography,” *Microelectron. Eng.* **78-79**, 490–495, 2005.
- [30] S. Wong, M. Deubel, F. Perrez-Willard, S. John, G. A. Ozin, M. Wegener, and G. von Freymann, “Direct laser writing of three-dimensional photonic crystals with a complete photonic bandgap in chalcogenide glasses,” *Adv. Mater.* **18**, 265–269, 2006.
- [31] D. A. Bernard, “Simulation of focus effects in photolithography,” *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **1**, 85, 1988.
- [32] T. A. Brunner, “Optimization of optical properties of resist processes,” *Proc. SPIE* **1466**, 297, 1991.
- [33] H. L. Chen, F. H. Ko, T. Y. Huang, W. C. Chao, and T. C. Chu, “Novel bilayer bottom antireflective coating structure for high-performance ArF lithography applications,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **1**(1), 58, 2002.
- [34] A. Erdmann, P. Evanschitzky, and P. De Bisschop, “Mask and wafer topography effects in immersion lithography,” *Proc. SPIE* **5754**, 383, 2005.
- [35] M. Zuniga, N. Rau, and A. Neureuther, “Application of general reaction/diffusion resist model to emerging materials with extension to non-actinic exposure,” *Proc. SPIE* **3049**, 256–268, 1997.
- [36] W. Henke and M. Torkler, “Modeling of edge roughness in ion projection lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **17**, 3112, 1999.
- [37] A. Erdmann, W. Henke, S. Robertson, E. Richter, B. Tollkühn, and W. Hoppe, “Comparison of simulation approaches for chemically amplified resists,” *Proc. SPIE* **4404**, 99–110, 2001.
- [38] J. S. Petersen, C. A. Mack, J. W. Thackeray, R. Sina, T. H. Fedynyshyn, J. M. Mori, J. D. Byers, and D. A. Miller, “Characterization and modeling of positive acting chemically amplified resist,” *Proc. SPIE* **2438**, 153–166, 1995.
- [39] M. Zuniga, G. Walraff, and A. R. Neureuther, “Reaction diffusion kinetics in deep-UV positive resist systems,” *Proc. SPIE* **2438**, 113–124, 1995.
- [40] H. Fukuda, K. Hattori, and T. Hagiwara, “Impact of acid/quencher behavior on lithography performance,” *Proc. SPIE* **2346**, 319–330, 2001.
- [41] C. A. Mack, “New kinetic model for resist dissolution,” *J. Electrochem. Soc.* **139**, L35, 1992.
- [42] S. A. Robertson, C. A. Mack, and M. J. Maslow, “Toward a universal

- resist dissolution model for lithography simulation," *Proc. SPIE* **4404**, 111, 2001.
- [43] M. Weiss, H. Binder, and R. Schwalm, "Modeling and simulation of chemically amplified DUV resist using the effective acid concept," *Microelectron. Eng.* **27**(1), 405–408, 1995.
- [44] T. F. Yeh, H. Y. Shih, and A. Reiser, "Percolation view of novolak dissolution and dissolution inhibition," *Macromolecules* **25**, 5345–5352, 1992.
- [45] A. Reiser, Z. Yan, Y.-K. Han, and M. S. Kim, "Novolak-diazonaphthoquinone resists: The central role of phenolic strings," *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 1288, 2000.
- [46] K. Motzek and S. Partel, "Modeling photoresist development and optimizing resist profiles for mask aligner lithography," in *9th Fraunhofer IISB Lithography Simulation Workshop*, 2011.
- [47] P. C. Tsiaertas, 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.
- [48] S. D. Burns, G. M. Schmid, P. C. Tsiaertas, and C. G. Willson, "Advancements to the critical ionization dissolution model," *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, 537, 2002.
- [49] 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.
- [50] S. D. Burns, A. B. Gardiner, V. J. Krukonis, P. M. Wetmore, J. Lutkenhaus, G. M. Schmid, L. W. Flanagin, and C. G. Willson, "Understanding nonlinear dissolution rates in photoresists," *Proc. SPIE* **4345**, 37, 2001.
- [51] J. A. Sethian, "Fast marching level set methods for three-dimensional photolithography development," *Proc. SPIE* **2726**, 262, 1996.
- [52] T.-B. Chiou, Y.-H. Min, S.-E. Tseng, A. C. Chen, C.-H. Park, J.-S. Choi, D. Yim, and S. Hansen, "How to obtain accurate resist simulations in very low-k₁ era?" *Proc. SPIE* **6154**, 61542V, 2006.
- [53] U. Klostermann, T. Mülders, D. Ponomarenco, T. Schmoeller, J. van de Kerkhove, and P. De Bisschop, "Calibration of physical resist models: Methods, usability, and predictive power," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(3), 33005, 2009.
- [54] P. De Bisschop, T. Muelders, U. Klostermann, T. Schmöller, J. J. Biafore, S. A. Robertson, and M. Smith, "Impact of mask 3D effects on resist model calibration," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(3), 30501, 2009.
- [55] G. M. Schmid, M. D. Smith, C. A. Mack, V. K. Singh, S. D. Burns, and C. G. Willson, "Understanding molecular-level effects during post-exposure processing," *Proc. SPIE* **4345**, 1037–1047, 2001.

- [56] A. Poonawala and P. Milanfar, "Mask design for optical microlithography: An inverse imaging problem," *IEEE Trans. Image Process.* **16**, 774, 2007.
- [57] X. Ma and Y. Li, "Resolution enhancement optimization methods in optical lithography with improved manufacturability," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **10**(2), 23009, 2011.
- [58] W. Lv, S. Liu, Q. Xia, X. Wu, Y. Shen, and E. Y. Lam, "Level-set-based inverse lithography for mask synthesis using the conjugate gradient and an optimal time step," *J. Vac. Sci. Technol. B* **31**, 041605, 2013.
- [59] T. A. Brunner and R. A. Ferguson, "Approximate models for resist processing effects," *Proc. SPIE* **2726**, 198, 1996.
- [60] N. B. Cobb, A. Zakhor, and E. A. Miloslavsky, "Mathematical and CAD framework for proximity correction," *Proc. SPIE* **2726**, 208, 1996.
- [61] J. Randall, H. Gangala, and A. Tritchkov, "Lithography simulation with aerial image—variable threshold resist model," *Microelectron. Eng.* **46**(1), 59–63, 1999.
- [62] Y. Granik, N. B. Cobb, and T. Do, "Universal process modeling with VTRE for OPC," *Proc. SPIE* **4691**, 377–394, 2002.
- [63] D. Fuard, M. Besacier, and P. Schiavone, "Validity of the diffused aerial image model: An assessment based on multiple test cases," *Proc. SPIE* **5040**, 1536, 2003.
- [64] D. Van Steenwinckel and J. H. Lammers, "Enhanced processing: Sub-50 nm features with 0.8 μm DOF using a binary reticle," *Proc. SPIE* **5039**, 225–239, 2003.
- [65] B. Tollkühn, A. Erdmann, A. Semmler, and C. Nölscher, "Simplified resist models for efficient simulation of contact holes and line ends," *Microelectron. Eng.* **78-79**, 509, 2005.
- [66] Y. Granik, D. Medvedev, and N. Cobb, "Toward standard process models for OPC," *Proc. SPIE* **6520**, 652043, 2007.
- [67] D. Flagello, R. Matsui, K. Yano, and T. Matsuyama, "The development of a fast physical photoresist model for OPE and SMO applications from an optical engineering perspective," *Proc. SPIE* **8326**, 83260R, 2012.
- [68] Y. Fan, C.-E. R. Wu, Q. Ren, H. Song, and T. Schmoeller, "Improving 3D resist profile compact modeling by exploiting 3D resist physical mechanisms," *Proc. SPIE* **9052**, 90520X, 2014.
- [69] C. Zuniga, Y. Deng, and Y. Granik, "Resist profile modeling with compact resist model," *Proc. SPIE* **9426**, 94261R, 2015.
- [70] C. A. Mack and J. E. Connors, "Fundamental differences between positive- and negative-tone imaging," *Proc. SPIE* **1674**, 328, 1992.
- [71] T. A. Brunner and C. A. Fonseca, "Optimum tone for various feature types: Positive versus negative," *Proc. SPIE* **4345**, 30, 2001.
- [72] C. Fang, M. D. Smith, S. Robertson, J. J. Biafore, and A. V. Pret, "A physics-based model for negative tone development materials," *J. Photopolym. Sci. Technol.* **27**(1), 53–59, 2014.

- [73] E. Richter, K. Elian, S. Hien, E. Kuehn, M. Sebald, and M. Shirai, “Negative-tone resist for phase-shifting mask technology: A progress report,” *Proc. SPIE* **3999**, 91, 2000.
- [74] D. De Simone, E. Tenaglia, P. Piazza, A. Vaccaro, M. Bollin, G. Capetti, P. Piacentini, and P. Canestrari, “Potential applications of negative tone development in advanced lithography,” *Microelectron. Eng.* **88**(8), 1917–1922, 2011.
- [75] W. Gao, U. Klostermann, T. Mülders, T. Schmoeller, W. Demmerle, P. De Bisschop, and J. Bekaert, “Application of an inverse Mack model for negative tone development simulation,” *Proc. SPIE* **7973**, 79732W, 2011.
- [76] P. Liu, L. Zheng, M. Ma, Q. Zhao, Y. Fan, Q. Zhang, M. Feng, X. Guo, T. Wallow, K. Gronlund, R. Goossens, G. Zhang, and Y. Lu, “A physical resist shrinkage model for full-chip lithography simulations,” *Proc. SPIE* **9779**, 97790Y, 2016.
- [77] X. Zhang, S. Debnath, and D. Güney, “Hyperbolic metamaterial feasible for fabrication with direct laser writing processes,” *J. Opt. Soc. Am. B* **32**(6), 1013–1021, 2015.
- [78] T. Mülders, H.-J. Stock, B. Küchler, U. Klostermann, W. Gao, and W. Demmerle, “Modeling of NTD resist shrinkage,” *Proc. SPIE* **10146**, 101460M, 2017.
- [79] S. D’Silva, T. Mülders, H.-J. Stock, and A. Erdmann, “Analysis of resist deformation and shrinkage during lithographic processing,” in *Fraunhofer Lithography Simulation Workshop*, 2018.
- [80] Y. Granik, “Analytical solutions for the deformation of a photoresist film,” *Proc. SPIE* **10961**, 109610D, 2019.

第 4 章

光学分辨率增强技术

本章将介绍在波长、数值孔径一定的情况下提高与优化光刻系统成像质量的方法。光学分辨率增强技术广泛应用于光刻系统中。前文章节中列举的许多例子都表明照明光的空间相干性或者几何形状会影响成像质量。本章 4.1 节解释了离轴照明提高成像分辨率和成像质量的原理。后续两节介绍几种与掩模有关的重要分辨率增强技术。其中，光学邻近效应修正（OPC）技术通过修改掩模图形的形状，补偿投影物镜的衍射极限以及相邻图形衍射光的相互作用导致的成像质量损失。相移掩模（PSM）利用不同区域的透射光的相位作为额外自由度，实现更高质量的成像。4.4 节讨论了投影物镜光瞳滤波技术的优缺点。

本章剩余部分讨论了两种重要的分辨率增强技术。为实现目标图形的高保真度成像，光源掩模优化（SMO）技术利用多种方法来确定最合适的光源和掩模几何形状。多重曝光技术组合利用不同的光源、掩模或者焦面配置提高分辨率，实现了给定光源、掩模与焦面条件下单次曝光不能达到的成像效果。

4.1 离轴照明

图 4.1 为离轴照明（OAI）实现分辨率增强的基本原理图。入射平面波被周期掩模衍射，产生离散的衍射级。图中仅显示了 0 级和 ± 1 级衍射光。

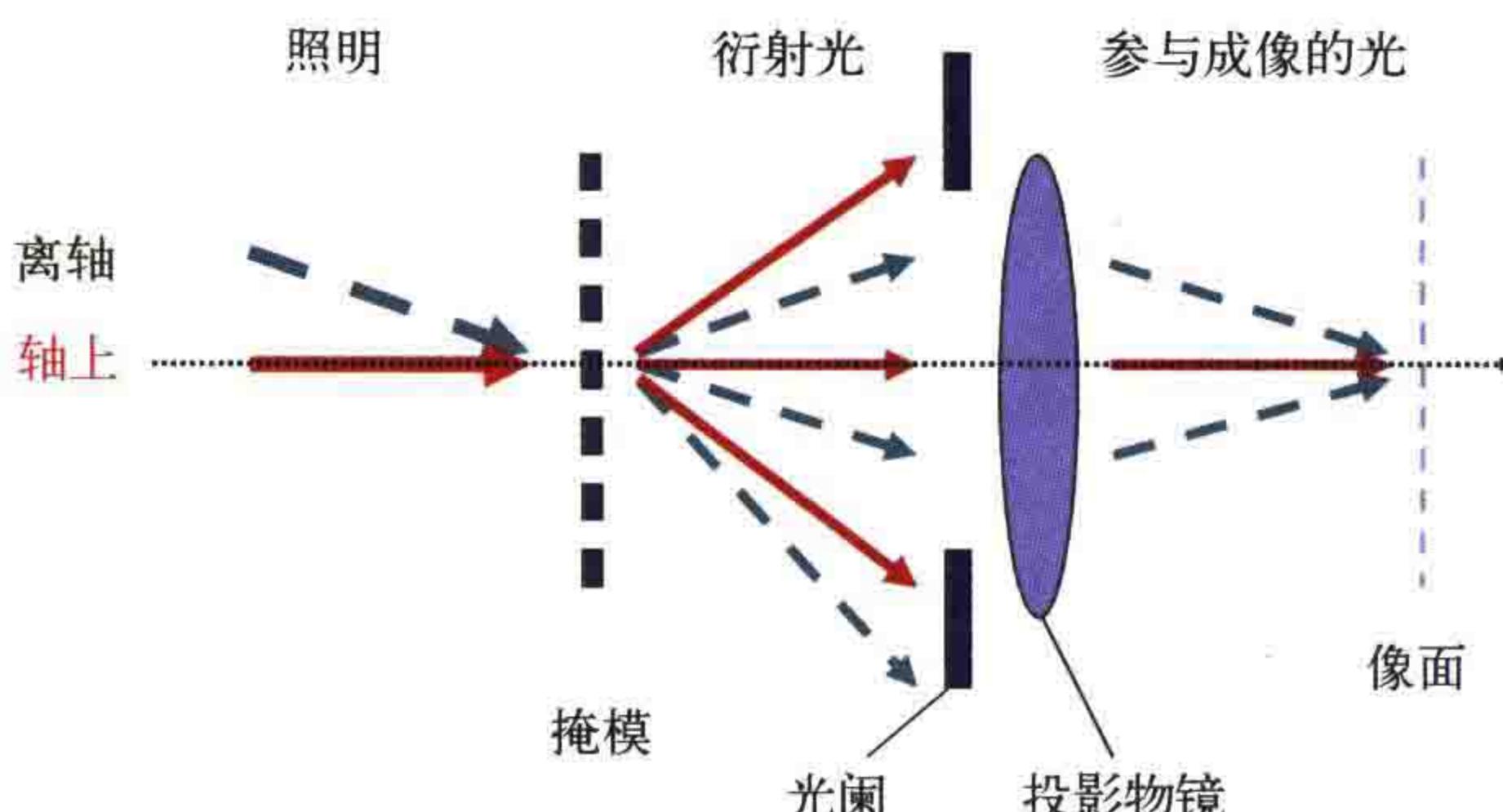


图 4.1 周期性线空图形成像的离轴照明光学分辨率增强原理示意图

平行光沿着光轴（细点线）方向照明掩模，产生的衍射级关于光轴对称。图形周期足够小时，只有0级光可以穿过投影物镜光阑，在像面形成均匀的强度分布，不包含图形的任何周期信息。只需简单地将入射光倾斜一个角度就可以改变这种情况。衍射级方向随光照方向的倾斜而变化。适当的离轴照明（虚线）使两个衍射级（0级和-1级）穿过光瞳传播至投影物镜像面，在像面形成干涉图。干涉图的周期与掩模图形的周期相同。

掩模图形的周期和方向决定了所需倾斜照明的方向和数量。如果线空图形发生了旋转，则需对照明倾斜方向进行相应的旋转。照明方向与掩模图形周期和方向的相关性，使得离轴照明分辨率增强技术只能适用于特定的掩模图形。

实际情况中，照明不只有一个倾斜角度。掩模被来自多个方向的光照明。以足够大范围的照明角度进行照明可以产生一定的空间非相干性，进而减少空间像中的旁瓣以及其他干扰现象。轴对称照明用于避免远心误差（与焦面有关的放置误差）。图4.2展示了现代步进扫描投影光刻机的几种标准照明形状，左上方的两个圆形照明（或传统照明）代表了老式照明系统中的“相干”和“非相干”两种照明设置。相干和非相干这两个术语并不完全正确，它们仅反映了早期光刻投影系统的缺陷。这两个照明系统都是部分相干的。右上方的两种二极照明分别是垂向（与y方向平行）和水平向（与x方向平行）线空图形的最佳照明模式。当掩模图形同时含有垂直和水平线空图形时，CQuad照明是最佳照明模式。左下角的环形照明是轴对称的，适用于任意方向的图形。四极照明，即旋转了45°的CQuad照明，是周期性正交接

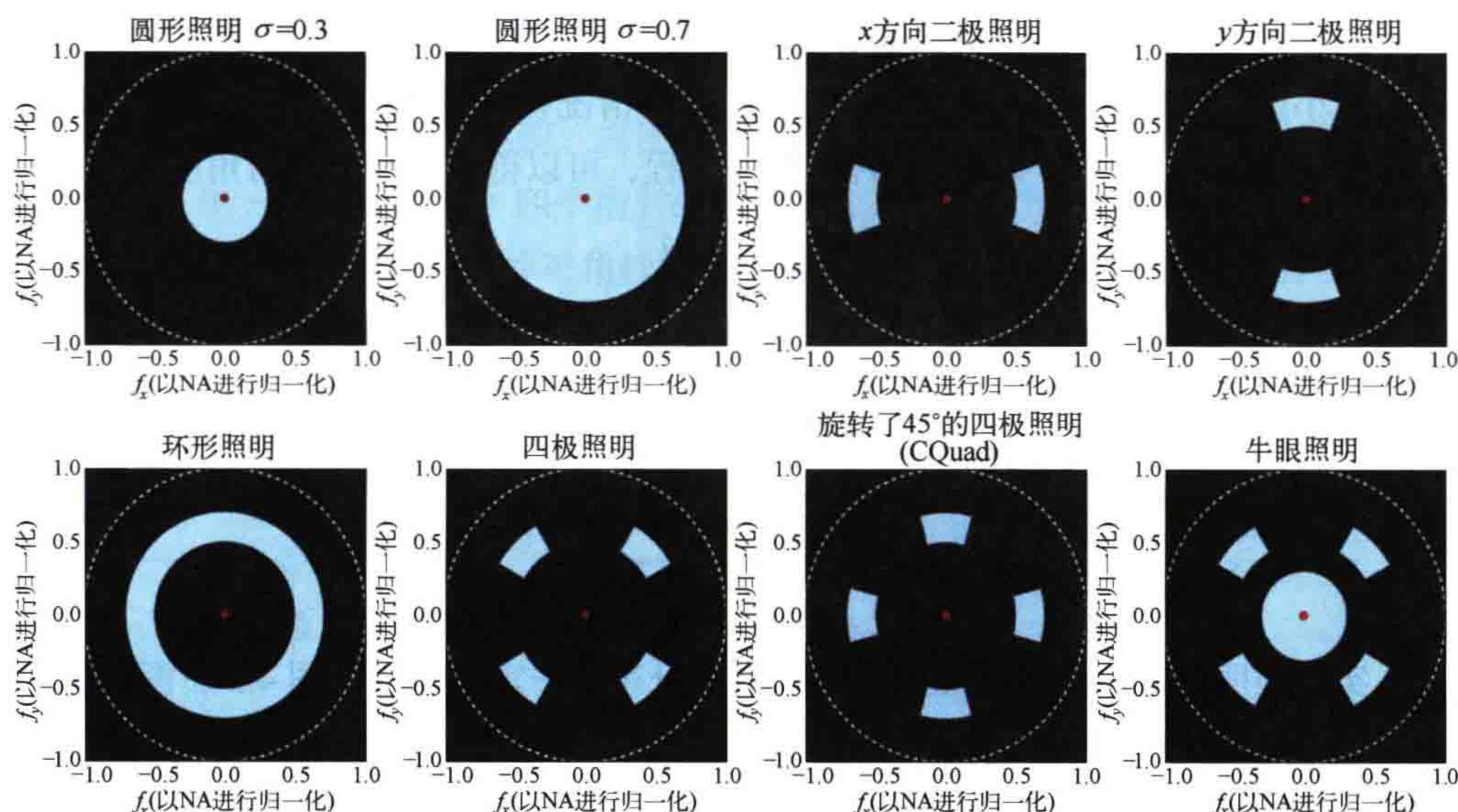


图4.2 投影光刻机的典型标准照明模式。浅色区域代表照射到掩模上光的方向。这些方向是相对于光轴的方向（每幅图的中心点），图中利用NA对它们进行了归一化处理（虚线圆）。转载自参考文献[1]

触孔阵列的最佳照明模式。当掩模包含周期性图形和孤立图形时，右下角的牛眼照明提供了一种可以兼顾两种图形成像性能的照明模式。

4.1.1 线空图形的最佳离轴照明

对于给定的掩模图形，最佳照明方向是什么？图 4.3 显示了二极照明情况下线空图形的成像，线空图形的周期为 p ，入射角为 θ_{in} ， m 级衍射光的衍射角 θ_{out}^m 可以通过光栅方程计算：

$$\sin \theta_{\text{out}}^m = \sin \theta_{\text{in}} + \frac{m\lambda}{p} \quad (4.1)$$

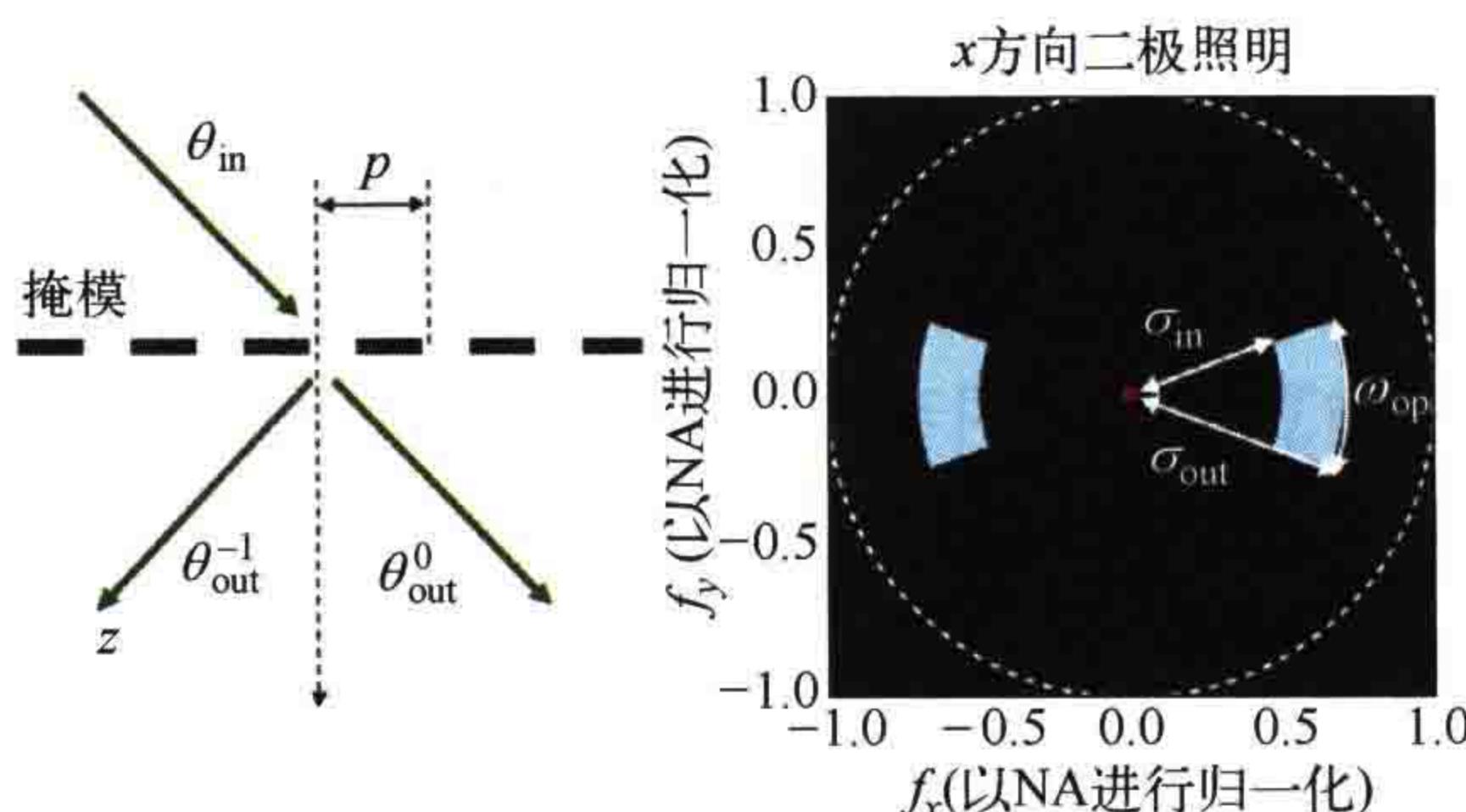


图 4.3 二极照明条件下周期为 p 的线空图形的成像。利特罗入射条件的光路侧视图（左图）与二极照明的俯视图（右图）

当 0 级和 -1 级衍射光对称地穿过光瞳时，可得出给定 NA 的成像系统可以分辨的最小图形周期，此时 $\sin \theta_{\text{out}}^{-1} = -\sin \theta_{\text{out}}^0$ 。这种情况被称为利特罗入射条件，如图 4.3 左图所示。结合利特罗入射条件和光栅方程，可以得到所需的人射角度：

$$\sin \theta_{\text{in}} = \frac{\lambda}{2p} \quad (4.2)$$

投影光刻中，通常利用投影物镜的 NA 对照明方向进行归一化 [见式 (2.12)]。最佳照明方向的表达式变为：

$$\sigma_{\text{opt}}^{\text{dipole}} = \frac{\sin \theta_{\text{in}}}{\text{NA}} = \frac{\lambda}{2p\text{NA}} \quad (4.3)$$

实际照明系统所发出的照明光的人射角分布在一定范围内。图 4.3 右图给出了一个典型的二极照明模式。描述单极的参数包括内部分相干因子 σ_{in} 、外部分相干因子 σ_{out} 、极张角 ω_{op} ，以及相对于坐标系 x 轴的方向角等。图中未标出坐标系。这种单极描述方法同样适用于四极照明、CQuad 等高阶多极照明。给定图形周期 p ，内部分相干因子和外部分相干因子可通过下式获得：

$$\sigma_{\text{out/in}}^{\text{dipole}} = \sigma_{\text{opt}} \pm \sigma_{\text{width}} / 2 = \frac{\lambda}{2p\text{NA}} \pm \sigma_{\text{width}} / 2 \quad (4.4)$$

式中, σ_{width} 表示极的宽度。 ω_{op} 的典型值为 $20^\circ \sim 90^\circ$ 。极的方向角与线空图形的方向一致。设定极的宽度是为了使数值孔径内光的分布变得平滑, 以减小透镜热效应。照明图形面积与光瞳总面积之比为光源填充比。典型光源填充比的大小为 20% 或更高。

4.1.2 适用于接触孔阵列的离轴照明

设接触孔阵列在 x 和 y 方向上的周期分别为 p_x 和 p_y 。将式 (4.1) 推广, 可以得到正交接触孔阵列的衍射光方向的表达式:

$$\begin{aligned} \sin \theta_{x,\text{out}}^m &= \sin \theta_{x,\text{in}} + \frac{m\lambda}{p_x} \\ \sin \theta_{y,\text{out}}^n &= \sin \theta_{y,\text{in}} + \frac{n\lambda}{p_y} \end{aligned} \quad (4.5)$$

衍射级分布在索引为 m 和 n 的正交网格上, 方向为 $(\sin \theta_{x,\text{out}}^m, \sin \theta_{y,\text{out}}^n)$ 。利用单次曝光制造正交接触孔阵列至少需要三列平面波参与干涉。图 4.4 为尺寸接近分辨率极限的接触孔成像时可能出现的情况。垂直入射 (左图) 时, 只有 $(0, 0)$ 级光位于 NA 内部参与成像, 在像面得到了均匀的光强分布。平行于 x 轴移动 (中图), 将一个额外的衍射级移进 NA, 所成的空间像类似于 y 向线空图形的空间像。接触孔图形的像可以通过将该空间像与 y 向倾斜照明条件下产生的另一个像进行非相干叠加得到。右图中衍射谱在对角线方向偏移, 将 $(-1, -1)$ 、 $(-1, 0)$ 、 $(0, -1)$ 和 $(0, 0)$ 四个衍射级移进 NA。单次曝光时这四个衍射级发生干涉形成接触孔阵列的像。这种对角线方向的移动可以利用图 4.2 中所示的四极照明实现。

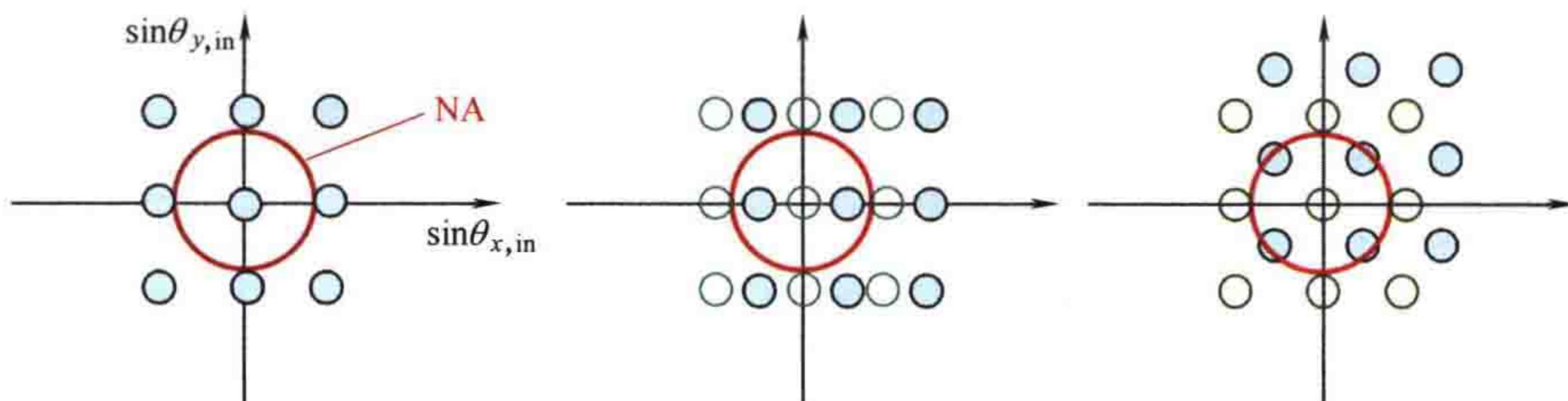


图 4.4 在衍射极限附近平移密集接触孔阵列图形衍射谱的几种情形。未平移和平移后衍射级的方向分别用空心圆和实心圆表示。垂直入射/垂直照明条件下的数值孔径如左图中的圆圈所示。斜入射光根据方向不同将衍射谱沿着 x 方向 (中图) 或者对角线方向 (右图) 平移

与式(4.3)类似,对x、y向周期都为p的接触孔阵列的成像,CQuad照明和四极照明的最佳极位置 $\sigma_{\text{opt}}^{\text{CQuad}}$ 、 $\sigma_{\text{opt}}^{\text{Quasar}}$ 可以根据下列公式推出:

$$\sigma_{\text{opt}}^{\text{CQuad}} = \frac{\lambda}{2pNA} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\text{opt}}^{\text{Quasar}} = \frac{\lambda}{\sqrt{2}pNA}$$

图4.5和图4.6显示了使用圆形(常规)、环形和四极照明获得的空间像和光刻工艺窗口。

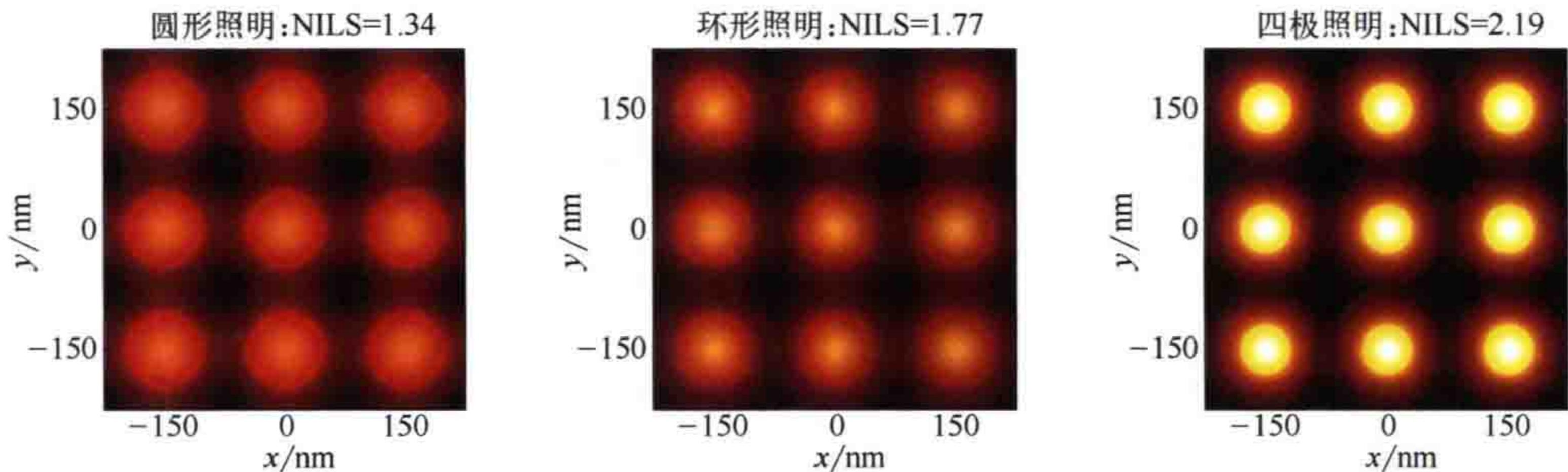


图4.5 不同照明模式下接触孔阵列的空间像。接触孔尺寸为75nm×75nm,周期为150nm×150nm。左图:圆形照明 $\sigma=0.5$ 。中图:环形照明 $\sigma_{\text{in}}/\sigma_{\text{out}}=0.66/0.86$ 。右图:四极照明 $\sigma_{\text{in}}/\sigma_{\text{out}}=0.66/0.86$, $\omega_{\text{op}}=20^\circ$ (极相对于x/y轴成45°角)。其他成像参数:波长193nm,数值孔径1.2

圆形和环形照明包含多个照明方向。进入投影物镜的衍射级少于4个。由于已根据图形周期对四极照明进行了优化,所以与四极照明相比,圆形和环形照明的成像对比度/NILS和焦深都更小。

研究目标图形衍射级在瞳面的位置与可能的偏移方式有助于利用解析法优化光源形状。Yulu Chen等人^[2]应用衍射级分析方法确定了金属层端到端结构对应的最佳光源形状。常利用圆之间的重叠区域描述解析法优化得到的光源。

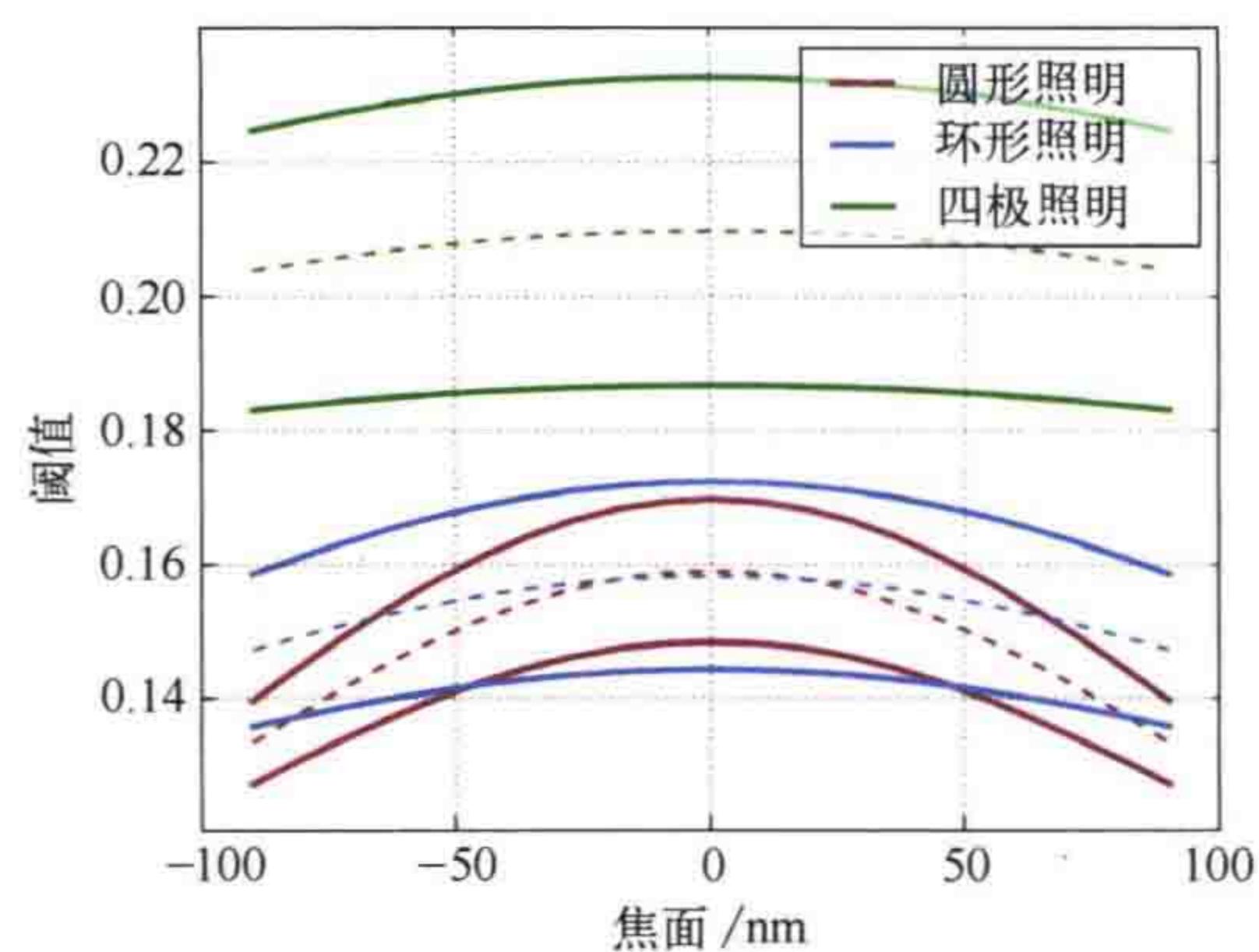


图4.6 不同照明模式下尺寸为75nm×75nm的接触孔图形的工艺窗口。仿真参数与图4.5所示的仿真相同

4.1.3 由传统和参数化光源形状到自由照明

上述举例已证明了离轴照明在简单图形密集阵列成像中的优势。掩模图形决定了最佳照明模式。几何结构复杂的图形需要复杂度更高的照明形状。图 4.7 说明了这一点。传统圆形照明条件下无法分辨掩模上的肘形图形。应用优化后的 x 方向二极照明后，虽然与 y 方向垂直线条的成像对比度很高，但仍然不能解决水平线条分辨率低的问题。增加水平方向的二极照明有助于分辨 x 方向平行线条，但与二极照明相比，降低了垂直线条的成像对比度。利用如右图所示的像素化自由照明可获得最佳的成像质量。

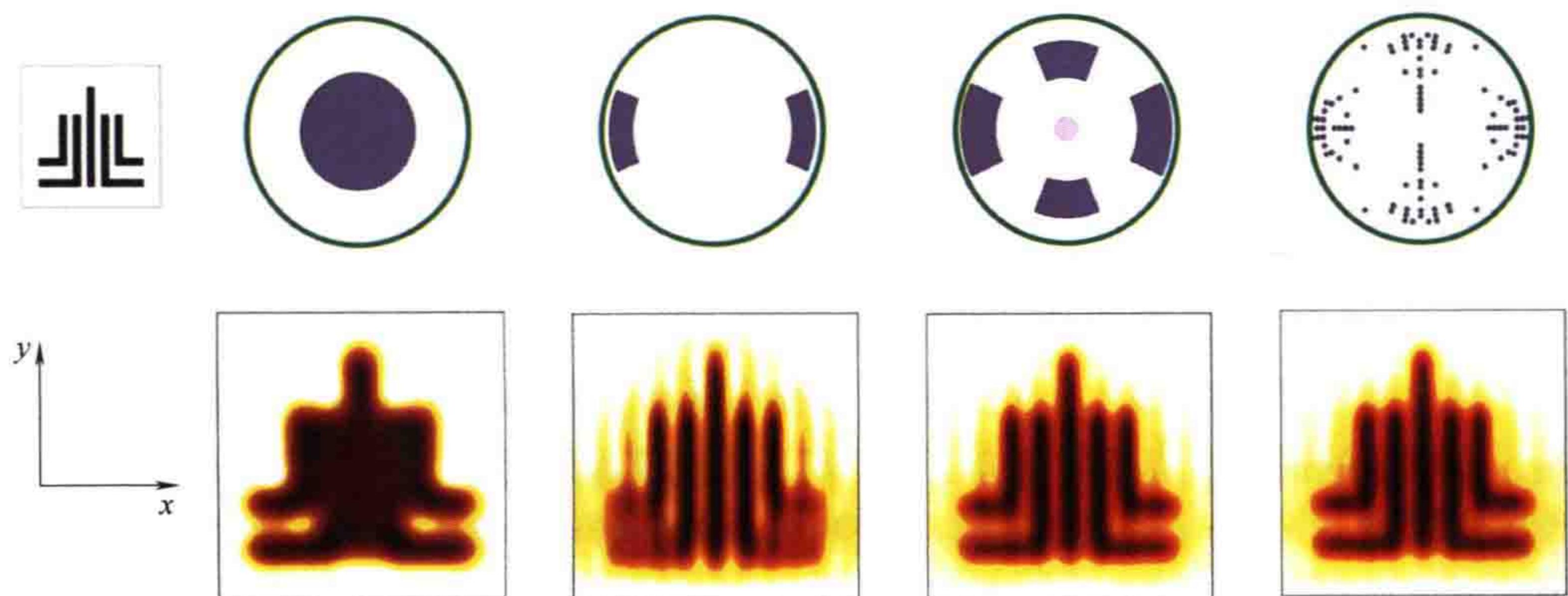


图 4.7 照明模式对左上角所示图形成像的影响。第一行为照明模式。从左至右分别为：传统圆形照明 ($\sigma=0.5$)，针对宽 45nm、周期 90nm 的垂直线条优化后的二极照明，适用于垂直和水平线的正交二极照明组合，优化后的自由照明。第二行为曝光波长 193nm、数值孔径 1.35 情况下的成像结果

给定掩模图形后，照明方向决定了哪些衍射级会参与成像。计算出典型照明方向下或者离散网格光源点条件下的 NILS 或者 DoF 等像质评价参数，有助于量化评估不同光源区域对成像质量的贡献大小。早期关于光源优化的文献中已经应用了这一思想^[3, 4]。在给定照明阵列（即照明模式）条件下对像质评价参数进行仿真，仿真结果可应用于先进 EUV 光刻成像系统成像特性的研究与优化^[5, 6]。4.5 节讨论了几种用于掩模和光源几何形状优化的计算方法。

利用可调锥形镜系统或衍射光学元件（DOE），可生成如图 4.2 所示的简单照明模式。DOE 提供了更多的优化自由度，便于生成自由照明模式，例如适用于复杂掩模图形的优化后照明模式。但是 DOE 制造不仅非常耗时，而且制造完成后 DOE 元件就固定不变了，在应对需要对光源形状进行精细调节的特殊问题时灵活性不足。为实现自由照明模式，最先进的步进扫描投影光刻机中配备了微反射镜阵列^[7, 8]。

对具体图形的专用性太强是离轴照明分辨率增强技术的主要不足。优化光源形

状可最大程度地改善密集图形阵列的成像质量。使用更激进的 OAI 分辨率增强技术会增加对设计的约束^[9]。光源和掩模优化的应用（见 4.5 节）使得光源的形状更加复杂。必须严格评估照明及其相对于设计光源的制造偏差对所有相关掩模图形成像质量的影响。对真实光源形状进行准确预测并应用于光刻建模，将有助于相关效应的研究^[10]。

照明光的最大倾角或者典型光刻照明系统的外部分相干因子受投影物镜系统数值孔径的限制。外部分相干因子等于 1 意味着掩模衍射光的 0 级恰好照射到投影物镜光瞳的边界。照明模式的 $\sigma \leq 1.0$ 时，0 级衍射光可穿过投影物镜光瞳参与成像，为亮场照明。 $\sigma > 1.0$ 的照明方向被认为是暗场照明，0 级衍射光无法通过投影物镜光瞳。这种情况下，大面积、均匀透光区域的成像会变暗。接触孔暗场成像的掩模误差增强因子和邻近效应很低，Crouse 等人^[11] 通过实验研究了这些效应。

4.2 光学邻近效应修正

第 2 章的图 2.18 显示了光刻微缩过程中低 k_1 成像条件下的光学邻近效应。显然， k_1 较低的情况下成像质量会下降。可以观察到线端缩短、拐角圆化、密集和孤立图形的线宽（CD）偏差等现象。光刻胶和刻蚀效应使得目标图形的转移受其周围图形的影响。

光学邻近效应修正（OPC）的目标是通过修正掩模图形补偿上述效应。为了使空间像或者光刻胶形貌更加接近目标，必须改变掩模图形的设计。图 4.8 为对掩模进行 OPC 的例子。OPC 后成像质量明显提高。可以根据经验丰富的光刻工程师建立的修正规则进行简单的掩模图形修正，这种方法即为基于规则的 OPC。基于模型的 OPC 使用（简化的）仿真模型来确定所需的图形修正量。反向光刻采用先进的优化技术确定能够光刻出目标图形的最优掩模图形。在深入研究各种 OPC 方法之前，让我们先详细地讨论两种特殊类型的邻近效应。

4.2.1 孤立 – 密集图形偏差的补偿

在 1.5 节讨论 OPE 曲线的线性度和周期相关性时，已经观察到了密集图形和孤立图形之间的成像差异。补偿这些差异的最直接方法是调整掩模上孤立图形的尺寸，即对孤立图形进行偏置。补偿后的成像横截面和工艺窗口如图 4.9 所示。在无偏置情况下（左），孤立线的宽度比密集图形中线条的宽度要小得多。这是由于线条周围的图形将大量的光衍射到了线条图形名义上的暗区内。与被其他线条包围的密集线相比，孤立线暗区内接收到的来自其周围透光区域的光更多。孤立线与密集线的工艺窗口没有重叠。图 4.9 所示的例子中，为了使硅片上孤立线和密集线的线

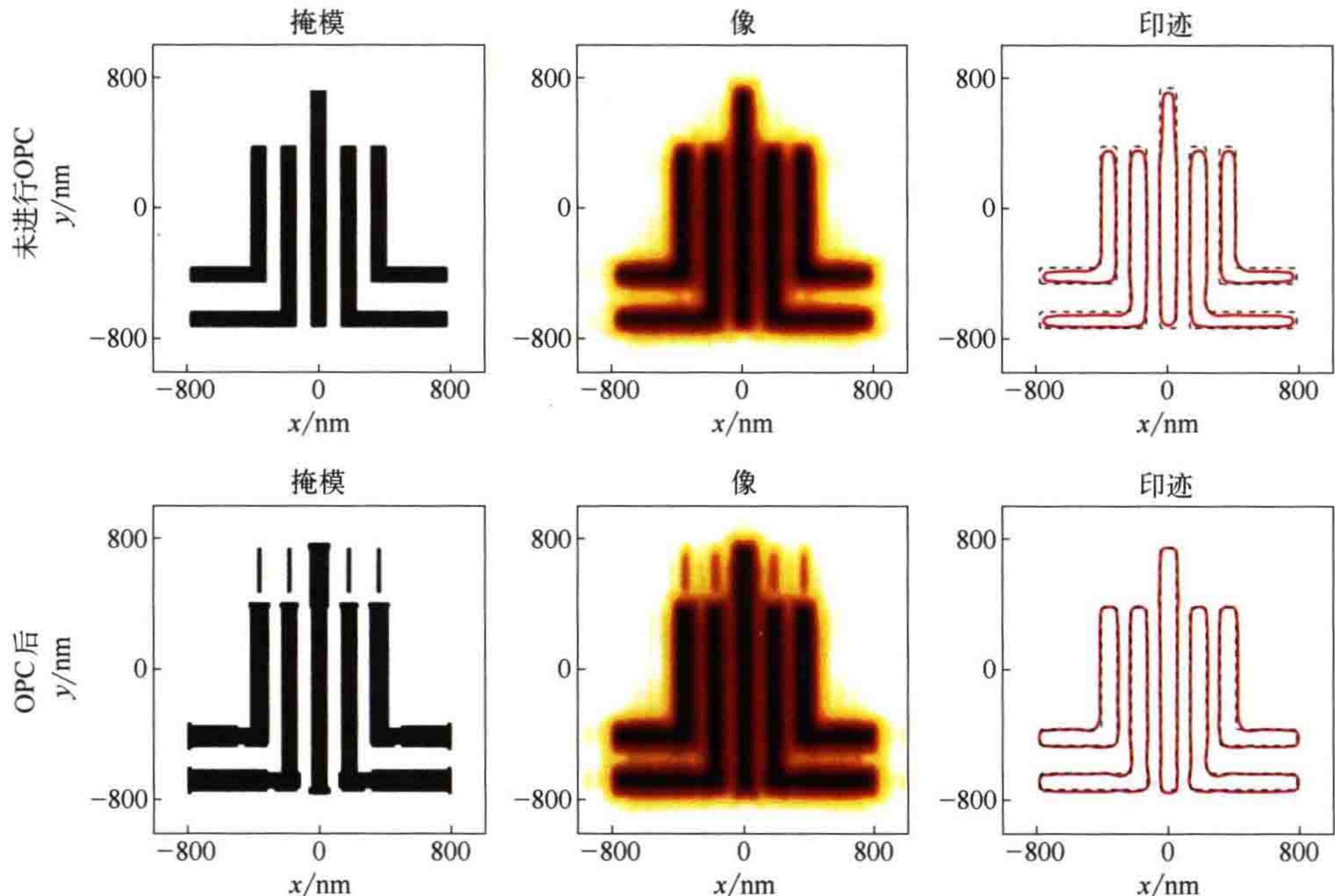


图 4.8 光学邻近效应示例。第一行：掩模版图（左）；空间像（中）；未进行 OPC 时的仿真印迹（实线）与设计目标（虚线）之间的对比（右）。第二行：OPC 之后相应的数据图。未进行 OPC 的线条宽度为 90nm。成像条件：波长 193nm，数值孔径 1.35，CQuad 照明， $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.7/0.9$ ， $\omega_{op}=40^\circ$

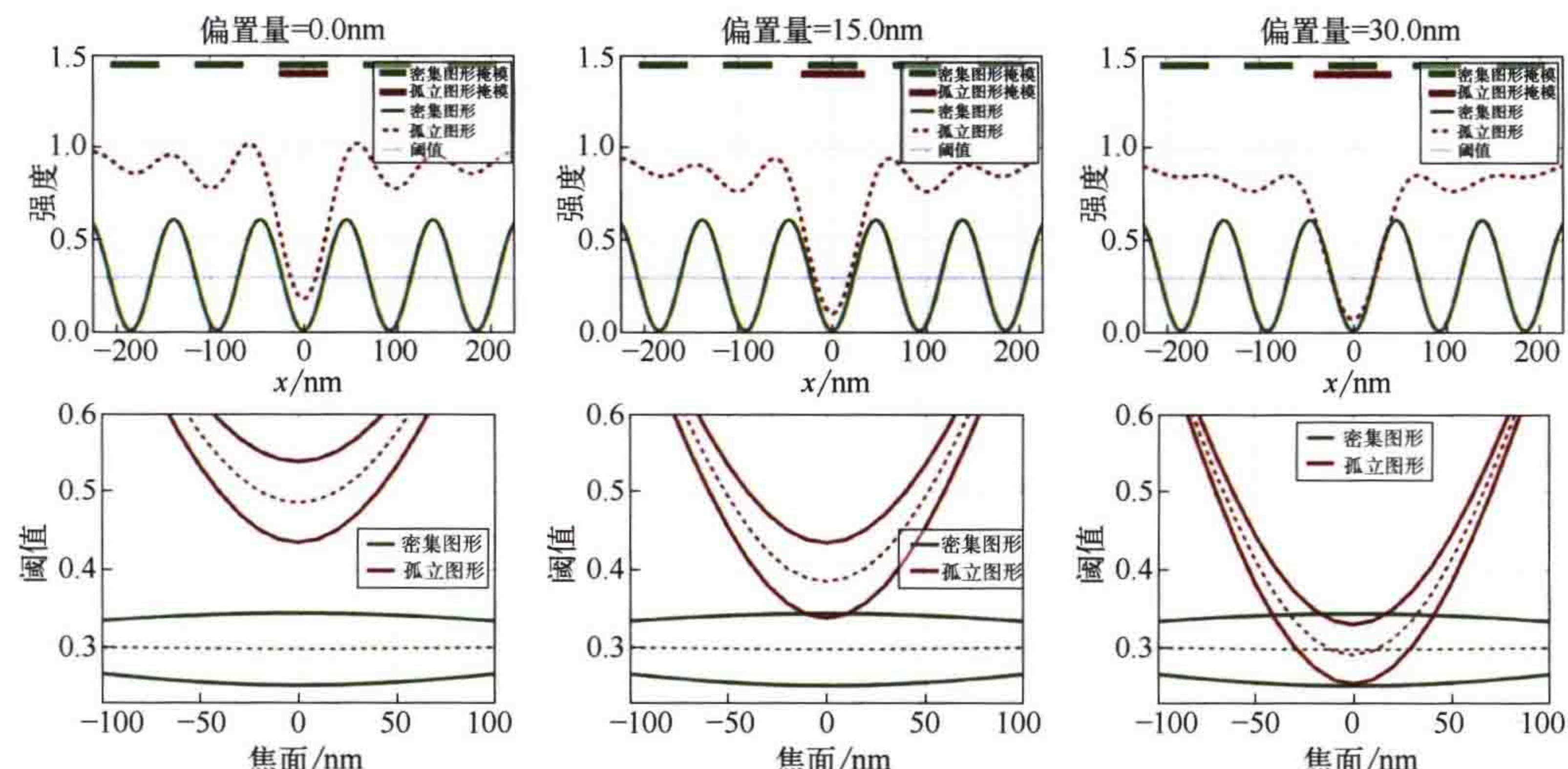


图 4.9 通过偏置孤立线条的宽度补偿 45nm 孤立线和密集线空图形之间的成像偏差。第一行：孤立线和密集线空图形的成像横截面图，从左至右对孤立线进行的偏置量分别为 0nm、15nm 与 30nm；偏置量是指使硅片面线宽发生的变化量。第二行：相应的工艺窗口。成像条件：波长 193nm，数值孔径 1.35，二极照明 $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.7/0.9$ ， $\omega_{op}=40^\circ$

宽一致，需要将掩模孤立线条的宽度增加 30nm。对孤立线进行偏置有助于使孤立线和密集线的工艺窗口重叠，但是并不会改善孤立线工艺窗口的曲率。孤立线对焦面变化的灵敏度明显高于密集线。

在所用的二极照明条件下，0 级光和 1 级光发生双光束干涉，实现密集线图形的成像。这些衍射光与光轴之间的距离都基本一致，穿过投影物镜时相位的变化几乎相同。此外，空间像强度的均值与目标尺寸阈值（THRS）接近。偏离最佳焦面会影响空间像强度的最大值和最小值，但不会影响目标尺寸阈值附近的空间像强度。这就是密集线图形焦深更大的原因。

孤立线图形的成像是通过多个衍射级之间的干涉实现的。这些衍射级与光轴之间的距离不同，穿过投影物镜后相位差很大。离焦系统中孤立图形使得光（或者暗区）发散，导致目标尺寸阈值附近的光强变化很大。尺寸接近分辨率极限时孤立图形的成像焦深很小。

为了降低对焦面变化的灵敏度，需要使孤立图形看上去更接近密集图形。图 4.10 展示了辅助图形（线）在孤立 - 密集图形成像偏差补偿中的作用。为确保不会被印出，辅助图形的尺寸必须足够小。同时为确保对局部图形环境的有效调制，辅助图形的尺寸又需要足够大。辅助衬线或者辅助图形使得孤立图形与密集图形的衍射谱更加相似。图中组合使用了辅助图形与主图形偏置两种方法。更宽的辅助图形可提高焦面稳定性、减少工艺窗口的曲率。然而，采用目标尺寸阈值时，辅助图形宽度越大，误印的可能性更高。图 4.10 中，辅助图形宽度的最佳值为 15nm（中间列）。它既不会印出，又明显增大了孤立图形的焦深。

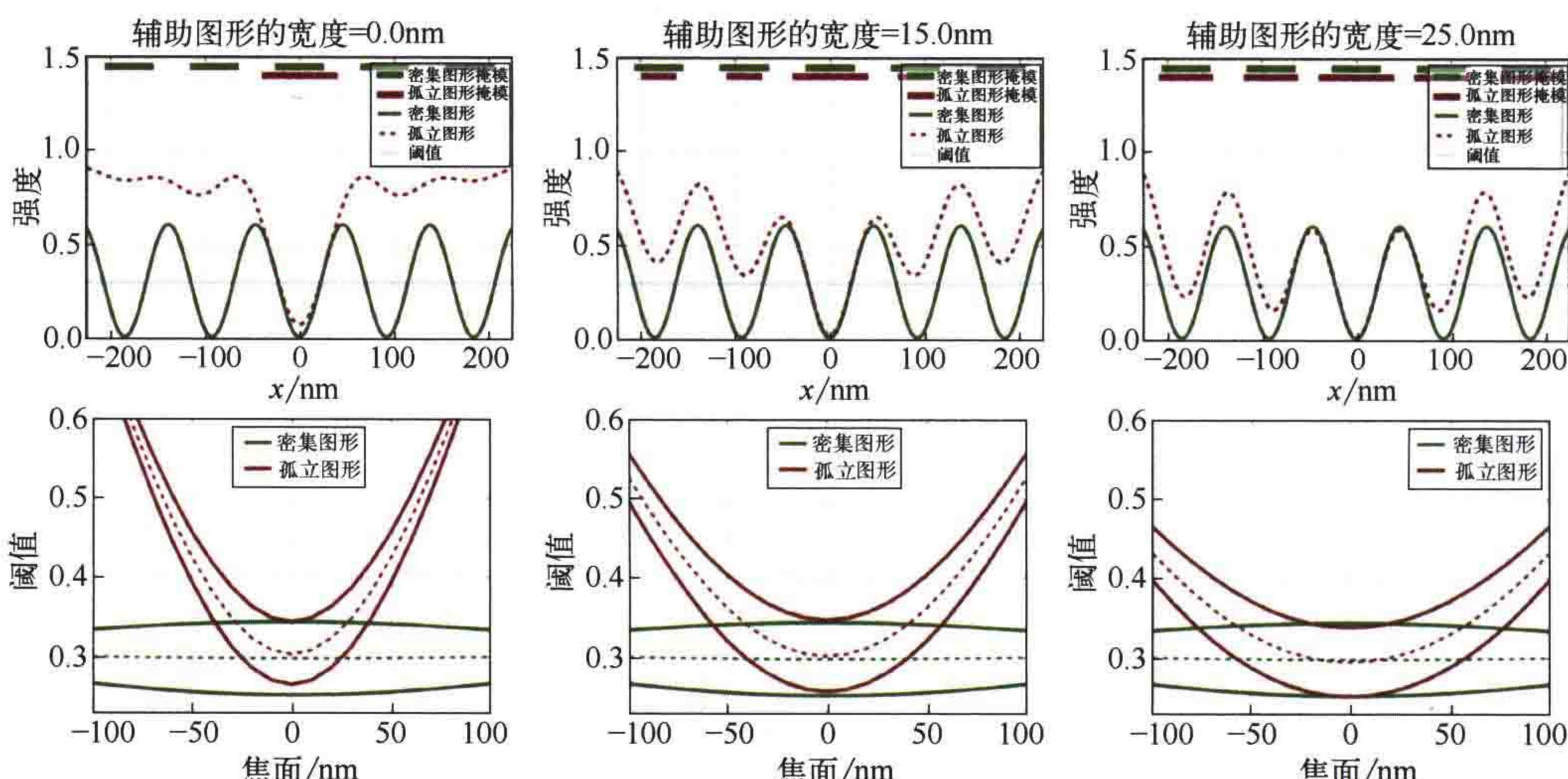


图 4.10 通过亚分辨率辅助图形补偿 45nm 孤立线和密集线空图形之间的成像偏差。第一行：孤立线和密集线空图形的成像横截面图，从左至右分别为增加了 0nm、15nm 与 25nm 宽的辅助图形。第二行：相应的工艺窗口。其他成像条件同图 4.9

辅助图形也可应用于半密集图形。两条半密集线之间可以放置的辅助图形的数量，取决于半密集线之间的可用空间。辅助图形尺寸和位置需要根据其他因素确定，见参考文献 [12-14]。

4.2.2 线端缩短的补偿

图 4.11 为空间像与线端印迹的仿真结果。光学系统的衍射受限特性导致线端圆化。硅片面线端区域的衍射光来自三个方向——左边、右边和上面的明亮区域。该区域内光线变多，导致了线条的长度与设计图形相比变短。可以在右图所示的仿真印迹中观察到这种现象。为了抵消这些效应，在线条末端加上一个额外的不透光结构，即所谓的衬线或锤头结构。增加额外结构后线端变长，实现了设计目标，拐角圆化效应也相应地减弱，如图 4.11 第二列所示。在周围添加亚分辨率辅助图形可以增大线端图形的焦深。

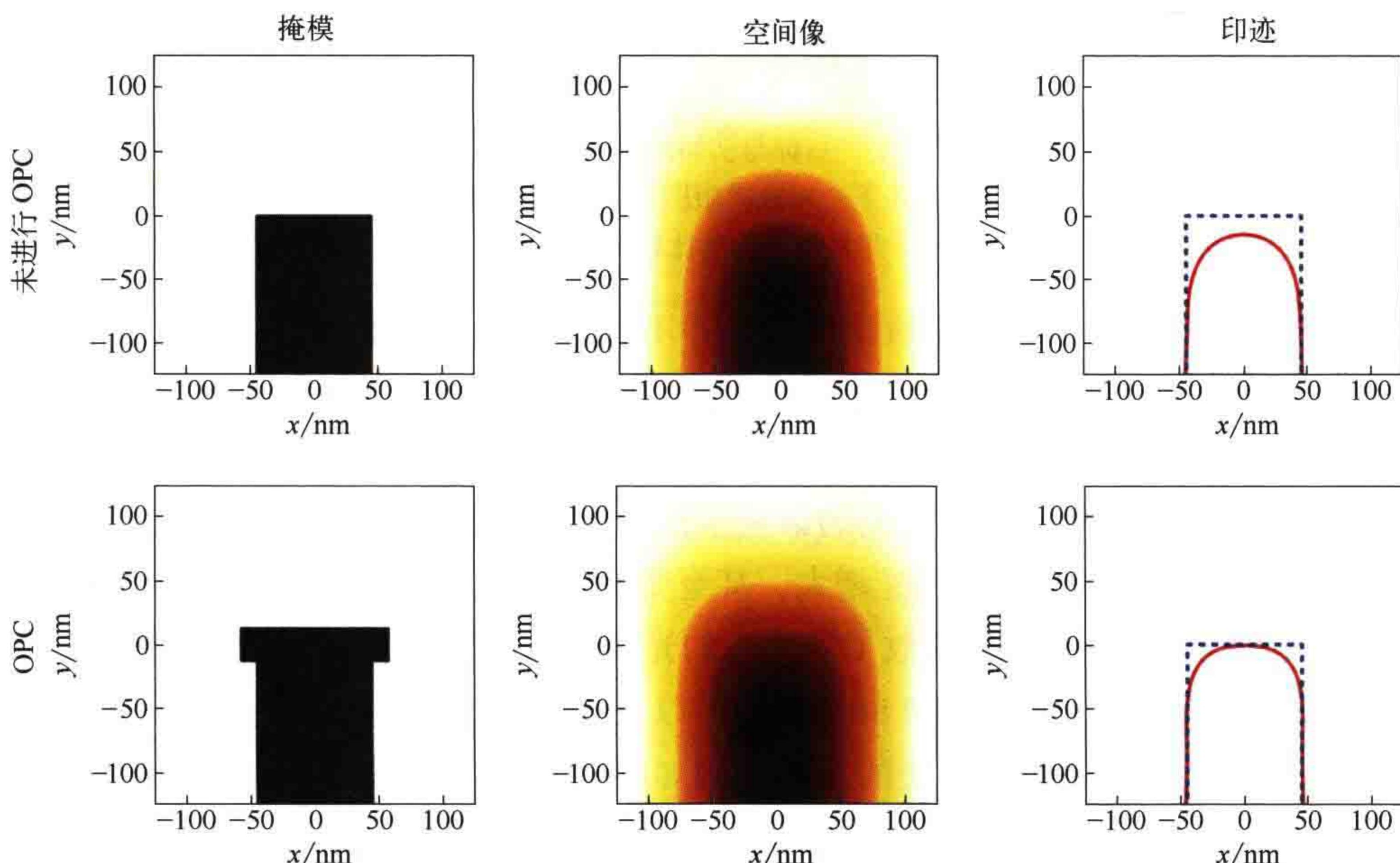


图 4.11 线端图形的简单 OPC。第一列为掩模版图，第二列为空间像，第三列为仿真印迹（实线）与设计目标（虚线）之间的对比；第一行为未添加亚分辨率辅助图形，第二行为添加后的结果。仿真条件：90nm 孤立线，波长 193nm，CQuad 照明，数值孔径 1.35

4.2.3 从基于规则的 OPC 到基于模型的 OPC，再到反向光刻

建立掩模图形校正规则之前，需要先测试偏置、辅助图形、衬线等类型的掩模校正量对光刻成像的影响。图 4.12 为一个简单的例子。如果使用左上的目标图形或设计目标作为掩模图形，则光刻胶印迹（右上）与目标图形之间存在明显偏差。与

目标图形相比，光刻胶印迹的两端缩短了。此外，拐角的轮廓形状发生了明显的变形。基于一些规则对图形进行修正，获得修正了光学邻近效应后的新掩模（OPC 掩模，左下）。修正后的掩模产生的印迹更接近目标（右下）。

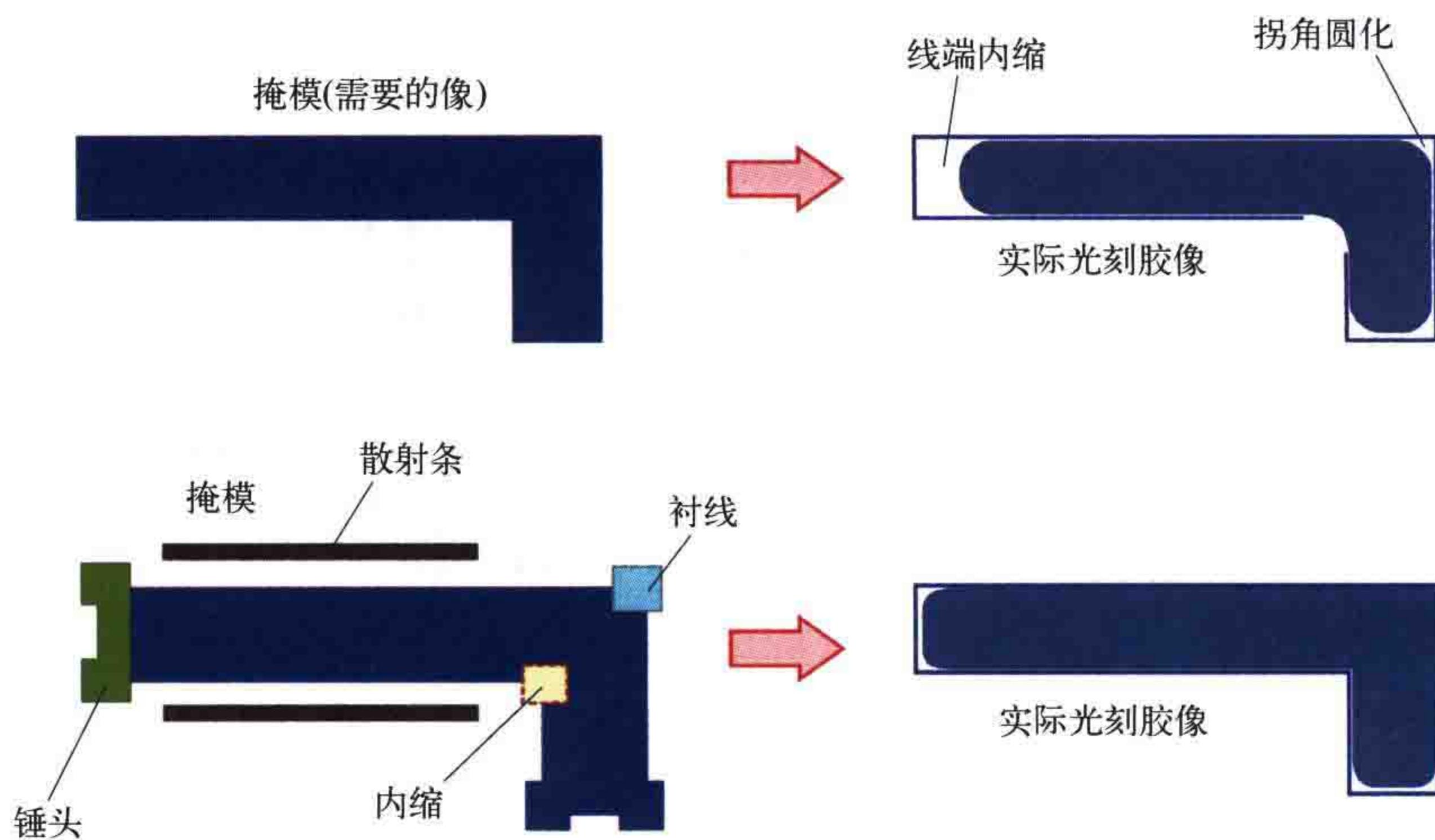


图 4.12 基于规则的 OPC 示例。左上：目标与初始掩模版图。右上：初始版图的印迹（阴影区域）与目标之间的比较（矩形轮廓线）。左下：对掩模版图应用基于规则的 OPC（OPC 后的掩模）。右下：OPC 后掩模的印迹（阴影区域）与目标之间的比较（矩形轮廓线图）。改编自参考文献 [15]

将校正规则应用于给定的设计图形并不难，但是，随着工艺因子 k_1 的减小，光刻工艺会产生更严重的邻近效应。不同图形之间相互影响的距离相对于图形的尺寸来说变得更大。需要考虑相互影响的情况越来越多，而且需要进行更复杂的掩模校正来补偿邻近效应。OPC 规则的数量呈指数增长。这使得基于规则的 OPC 在先进半导体制造中应用的难度迅速增大，甚至变得不可行。

基于模型的 OPC 采用高效（紧凑）的光刻成像和光刻胶工艺模型来预测掩模图形所需的修正量。Rieger 和 Stirnimann^[16] 以及 Nick Cobb^[17] 提出了这种 OPC 的基本思想、概念和方法。该方法的基本思想如图 4.13 所示。首先，原始掩模图形的边被分成若干小段，这个过程称为分段。然后，根据目标改变各部分的位置，使目标图形与修正后掩模的印迹之间的差异最小。每次迭代中都会执行一次仿真。Cobb 使用了一种 SOCS 成像算法高效地计算空间像（见 2.2.3 节）。Rieger 和 Stirnimann 采用了经验模型。该模型采用基于卷积核函数的卷积运算作为基础运算。由于卷积运算的数值计算效率很高，且只需要计算图形边缘的像或者计算边缘放置误差，所以基于模型的 OPC 适用于大面积掩模的修正，适用于全芯片图形。

第一个基于模型的 OPC 通过对已知解进行微扰得到修正后的掩模图形。这种方法一般无法得到最优掩模图形。例如最早的基于模型的 OPC 方法，如图 4.13 所示，虽然已经证明了辅助图形可增加孤立和半密集图形的焦深，但是该方法不能产

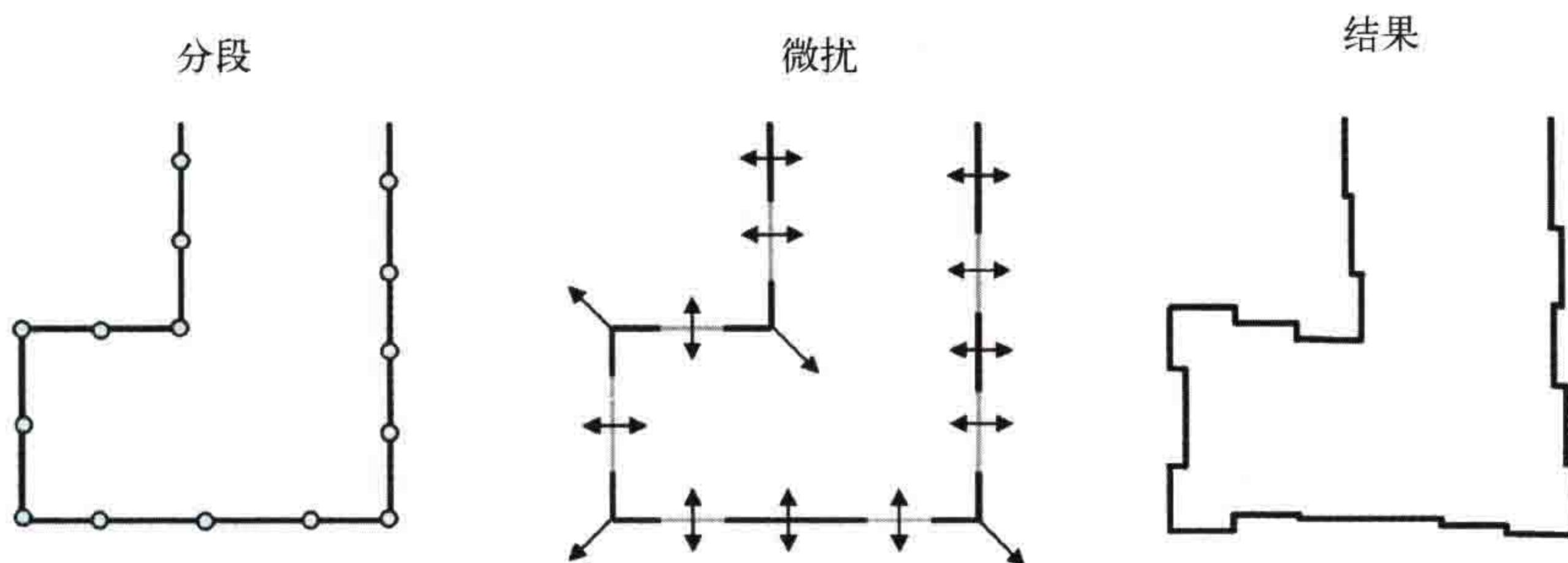


图 4.13 基于模型的 OPC 的一般流程：分段（左）；对初始版图施加微扰（中）；优化后的掩模版图（右）。改编自参考文献 [18]

生亚分辨率辅助图形。目前已有很多种基于规则和模型的辅助图形插入策略。这些策略包括物理干涉图的策略^[19]、基于数值网格贡献度计算的策略^[20]，以及机器学习的策略^[21]。

通常，可将 OPC 看作图像合成问题，对一个特征已知的系统，设计输入图像（或掩模），使系统的输出尽可能逼近目标图像^[22]。研发先进 OPC 算法首先需要建立逆向问题^[23]的抽象数学公式（见图 4.14）。为实现此目的，数学上将成像过程表示为：

$$I(x, y) = \Theta\{m(x, y)\} \quad (4.7)$$

式中， $\Theta\{\cdot\}$ 表示正向成像模型，将掩模透过率函数 $m(x, y)$ 映射为系统输出的光强函数 $I(x, y)$ 。 Θ 通常是不可逆的。寻找可以使成像强度分布接近目标强度分布 $\tilde{Z}(x, y)$ 的最优掩模图形 $\hat{m}(x, y)$ 的问题可以转化为如下最优化问题：

$$\hat{m}(x, y) = \arg \min_{m(x, y)} \tilde{d}\left[\tilde{Z}(x, y), \Theta\{m(x, y)\}\right] \quad (4.8)$$

式中， $\tilde{d}[\cdot, \cdot]$ 是距离的度量，评价所成的像与目标像之间的相似度。更多有关光源掩模优化（SMO）与反向光刻技术（ILT）评价函数的讨论，请见 4.5 节。为了实际可用，优化后的掩模图形 $\hat{m}(x, y)$ 还应具备良好的可制造性。

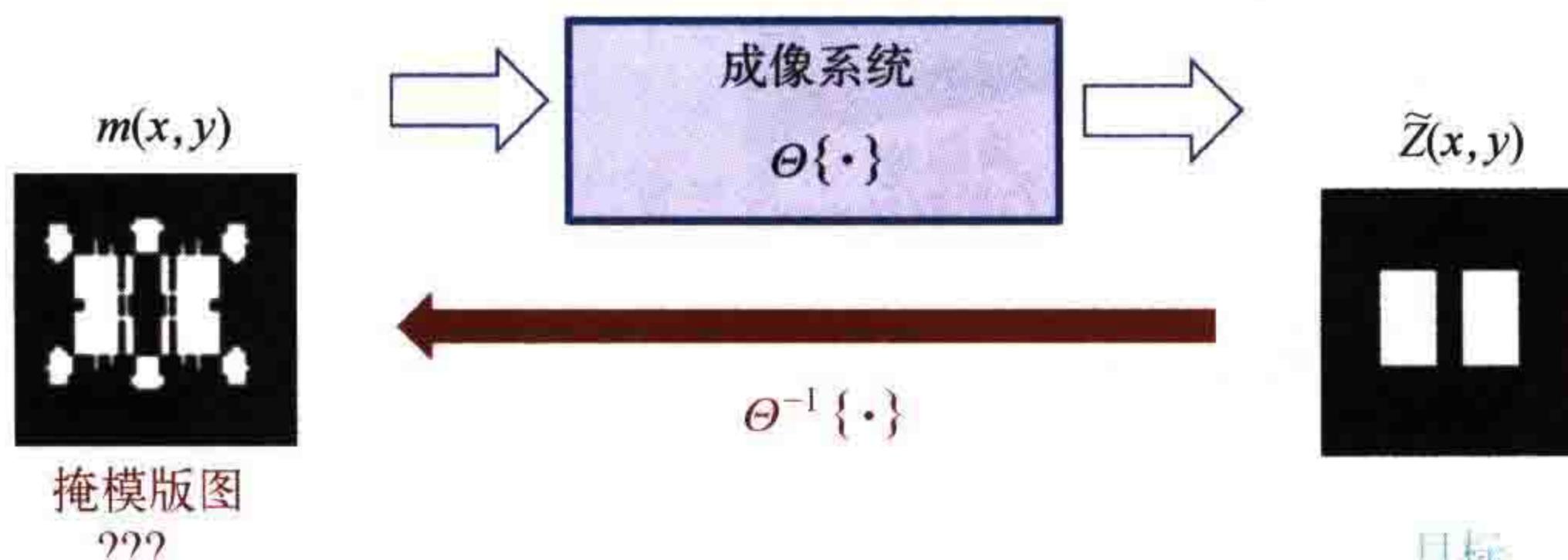


图 4.14 反向光刻技术的一般方案。详细讨论请见 4.5 节及参考文献 [28]

早期解决上述优化问题的研究有像素翻转技术、模拟退火技术和交替投影技术^[22, 24 - 26]。在图形优化过程中可采用不同的正则化方法获得可制造的掩模。Granik^[27]对近年的反向求解掩模问题的方法进行了系统地概括和分类。最先进的ILT将计算高效的成像（和光刻胶）模型和各种先进优化技术相结合，来确定对应于给定设计的最佳掩模图形。掩模优化和光源优化的技术方案相似。这些技术常被组合应用于光源掩模联合优化技术。4.5节概述了这些技术，讨论了几项重要的内容，并列出了相关文献和本书用例的详细参考文献。

虽然ILT提供了（理论上）最好的解决方案，但它很少应用于整个版图。在实际应用中，常采用ILT优化热点区域的掩模版图。版图中的热点位置非常容易出现图形转移错误。ILT还被用来生成辅助图形的放置规则^[29, 30]。

4.2.4 OPC 模型与工艺流程

目前，基于模型的OPC已成为先进半导体制造的标准工艺步骤。图4.15为当前常用的OPC模型，包含了处理各种光学、光刻胶效应的方法。先进的光学模型不仅涵盖了高NA成像系统中的偏振效应，还包括杂散光（来自粗糙表面的随机散射光）和激光带宽效应（波长微小变化引起的波像差和其他成像特性的微小变化）（见第8章）。对掩模和不平整硅片引起的光散射效应（即所谓的三维掩模效应和硅片形貌效应）进行正确建模，需要用到严格电磁场仿真技术（见第9章）。三维光刻胶模型和刻蚀模型常被用来精确地描述图形的转移。对掩模刻写和掩模工艺修正

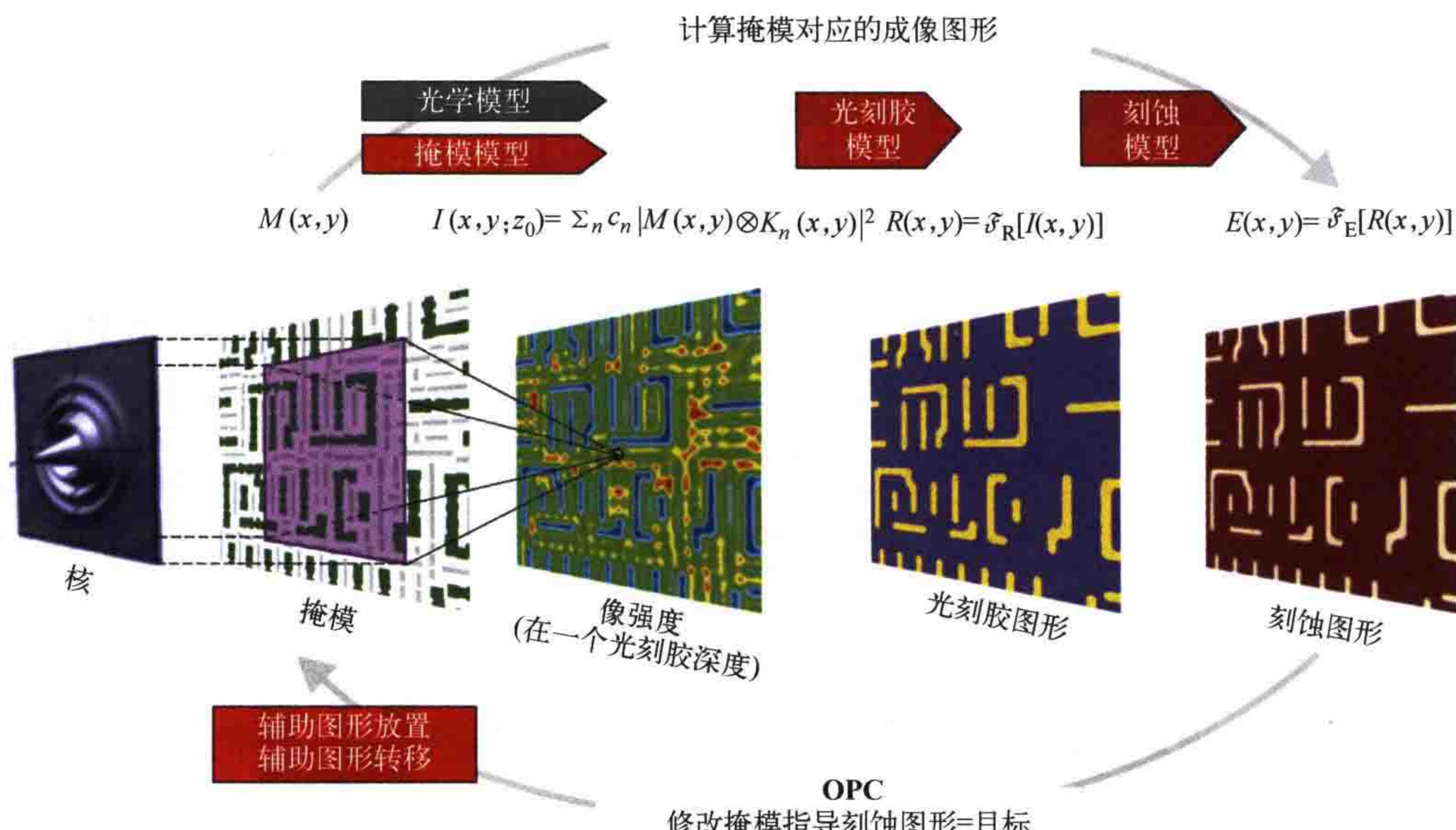


图4.15 OPC计算给定掩模的硅片面图形时采用的模型和步骤示例图。经许可转载自参考文献[31]，
版权(2016)，日本应用物理学会

过程中各种效应的建模也变得越来越重要。EUV 光刻中，OPC 技术会面临一些特有的挑战（见第 6 章）。

Peter De Bisschop 对 OPC 建模，以及建模和模型验证所需要考虑的实际问题进行了文献综述^[32]。通常，OPC 模型的思想来自传统光刻仿真的物理模型。为了在合理的时间内对整块掩模进行邻近效应修正，需要将模型重新构造为卷积核的形式，以支持快速计算。这些紧凑模型的大部分参数都无法直接测量，特别是光刻胶模型的参数。这些模型参数需要根据实验数据来校准。必须通过严格仿真或实验对 OPC 模型中三维掩模模型和硅片效应模型的参数进行标定。为了建立准确的 OPC 模型，需要开发专门的计量方法和抽样策略来获取所需的实验数据。在某些情况下，需要利用全物理模型的仿真数据对这些实验数据进行补充。掩模规则约束（MRC）是掩模数据准备（mask data preparation）的重要组成部分，用于确保掩模的制造精度。最后，必须通过严格物理仿真和专门的硅片曝光实验对建好的模型进行验证^[31]。

除了提高掩模工艺的分辨率外，OPC 不需要增加新材料或新工艺。它可以应用于标准（二元）玻璃 - 铬掩模与其他掩模技术。对掩模设计的影响等级为中等，影响的程度取决于 OPC 的复杂度（分块的大小和数量、辅助图形的数量等）。对具有许多细碎 OPC 图形的掩模进行规格说明和制造需要的数据量大、掩模刻写时间长。OPC 也增加了掩模检测的复杂性。例如，难以将掩模上的某些亚分辨率 OPC 图形和缺陷区分开。OPC 对工艺改进的影响程度为中等水平。OPC 使得更小 k_1 工艺因子的技术能够得到应用，提高了工艺的线性度、增大了可实现的工艺窗口。

4.3 相移掩模

OPC 通过修改不透光或透光图形的几何形状来优化掩模图形。该技术不改变图形透射光的强度或相位。相移掩模（PSM）通过调整掩模图形透射光的相位与透过率改善成像质量。利用（强度）透过率 \tilde{T} 与相位 ϕ 来描述掩模图形：

$$\begin{aligned}\tilde{T} &= \frac{I_{\text{trans}}}{I_{\text{inc}}} \\ \phi &= \phi_{\text{trans}} - \phi_{\text{ref}}\end{aligned}\quad (4.9)$$

式中， $I_{\text{trans}}/I_{\text{inc}}$ 分别为透射光强度和入射光强度；相位 ϕ 是图形的透射相位 ϕ_{trans} 与给定参考平面的相位 ϕ_{ref} 之差。

掩模上透过率值和相位值的数量是有限的。一般来说，每多一个透过率 / 相位的组合（或称为阶数）都会增加若干个（掩模制造）工艺步骤，使掩模更加昂

贵。在半导体制造中，大多数掩模是二阶或三阶掩模。它们具有两种或三种不同的透过率与相位值组合。灰度掩模的透过率值更高，可用于制作表面不平的三维光刻胶形貌，也可用在一些其他应用中来生成图形（见 7.4.1 节），但是这些情况比较少见。

用于半导体制造的相移掩模可分为两类。强相移掩模由具有两个不同相位值的全透光图形 ($\tilde{T}=1$, $\phi=0^\circ/180^\circ$) 与不透光图形 ($\tilde{T}=0$) 组成。弱相移掩模包含多个半透明图形 ($0 < \tilde{T} < 1$)，这些图形相对于全透光图形存在 180° 相移。下面介绍这些相移掩模的优缺点。

4.3.1 强相移掩模：交替型相移掩模

相移掩模实现分辨率增强的基本原理如图 4.16 所示。图示为两个相邻狭缝的成像。照明为相干光照明，在照明系统光瞳上显示为一个位于光轴上的点。左图是狭缝在像面的标量光场振幅。右图为不同类型掩模情况下两个狭缝对应光场叠加后的强度。当两个狭缝的透射光相位相同时，将两狭缝的振幅相加，得到二元掩模成像的强度：

$$I_{\text{binary}} = (a_{\text{left}} + a_{\text{right}})(a_{\text{left}}^* + a_{\text{right}}^*) \quad (4.10)$$

相距 80nm 的相邻狭缝的透射光发生相长叠加，像融合在一起形成一个单峰。显然成像系统不能分辨这两条狭缝。

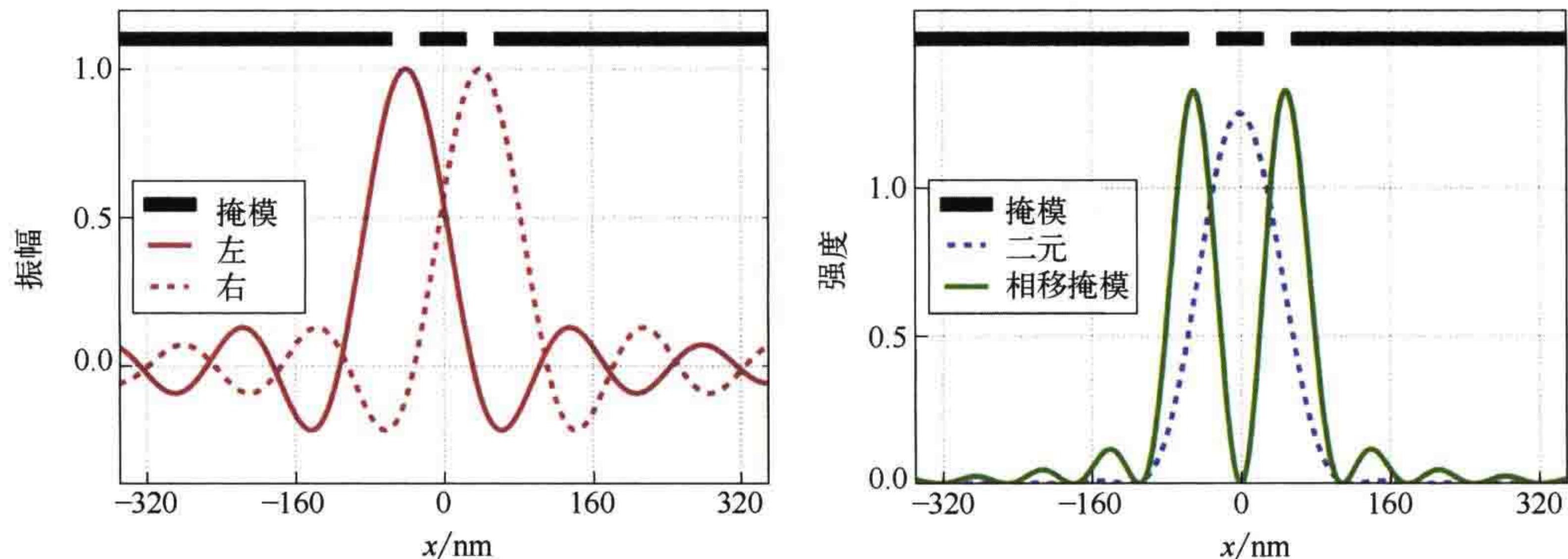


图 4.16 相干照明条件下两个相邻狭缝的成像。左右狭缝在像面的光场振幅（左），以及二元掩模和相移掩模的像面光强（右）。两个狭缝之间的间隔为 80nm。成像条件：波长 193nm，数值孔径 1.35，狭缝宽度 45nm

交替型 PSM 上相邻狭缝的透射光之间存在 180° 相移。此时，式 (4.10) 中复振幅存在 180° 相移，表现为左右两个振幅之间的正号变为负号：

$$I_{\text{PSM}} = (a_{\text{left}} - a_{\text{right}})(a_{\text{left}}^* - a_{\text{right}}^*) \quad (4.11)$$

振幅相减操作使相邻狭缝之间的强度分布为零，与狭缝之间的距离无关。这些狭缝可以被成像系统分辨。

同样，可以在傅里叶空间或光瞳面上解释交替型 PSM 实现分辨率增强的原理。图 4.17 展示了选用不同的掩模类型时周期性线空图形的成像过程。如前所述，垂直入射光照明情况下，衍射光关于光轴上 0 级衍射光对称。在图中所示的情况下，只有 0 级光通过光瞳 NA，像面光强为常数。

图 4.17 中每间隔一个透光空设置有相移层，使得衍射光的周期加倍、衍射角减半。由于相邻图形透射光相位的符号相反，0 级光（所有区域的平均透射振幅）消失。交替型 PSM 的正负一级光通过光瞳 NA。两列波在像面发生干涉形成干涉图。干涉条纹的周期与掩模图形的周期相同。显然，交替型 PSM 上的线空图形空间上可分辨。从图 4.17 还可以看出，将交替型 PSM 与离轴照明组合使用不利于成像。倾斜照明将其中的一个衍射级移出光瞳，产生了没有任何强度调制的像。

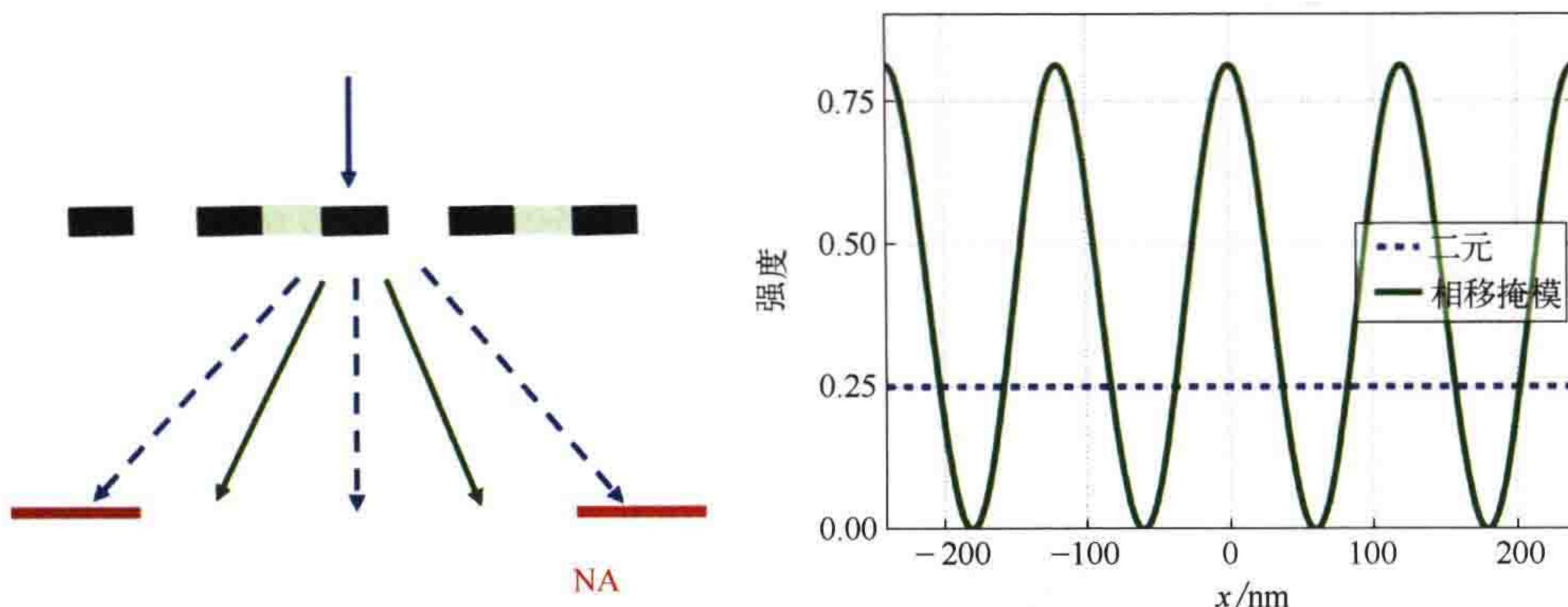


图 4.17 相干照明条件下二元掩模和交替型相移掩模周期线空图形的成像。左图：基本光路结构和衍射级次在给定 NA 投影物镜光瞳面上的位置，掩模下方的虚线代表衍射级次，实线表示交替型相移掩模的衍射级次。右图：二元掩模和相移掩模在像面的光强。成像条件：波长 193nm，数值孔径 0.85，空的宽度为 60nm，线图形的周期为 120nm

图 4.18 展示了交替 PSM 上相邻透光图形之间相移的实际实现方法。光源发出的光照射到掩模基底上，向含图形的吸收层传播。二元掩模的基底厚度均匀（此处未显示）。因此，在二元掩模透光区域的光的相位也是均匀的。交替型相移掩模基底的厚度不均匀。交替型 PSM 上的相移透光区域是通过刻蚀掩模基底实现的，根据光程差可以得到实现 180° 相移所需的刻蚀深度 d_{etch} ：

$$d_{\text{etch}} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{sub}} - n_{\text{air}})} \quad (4.12)$$

式中， n_{sub} 和 n_{air} 分别是掩模基底（通常是石英）和掩模下方材料（通常是空气或真空）的折射率。

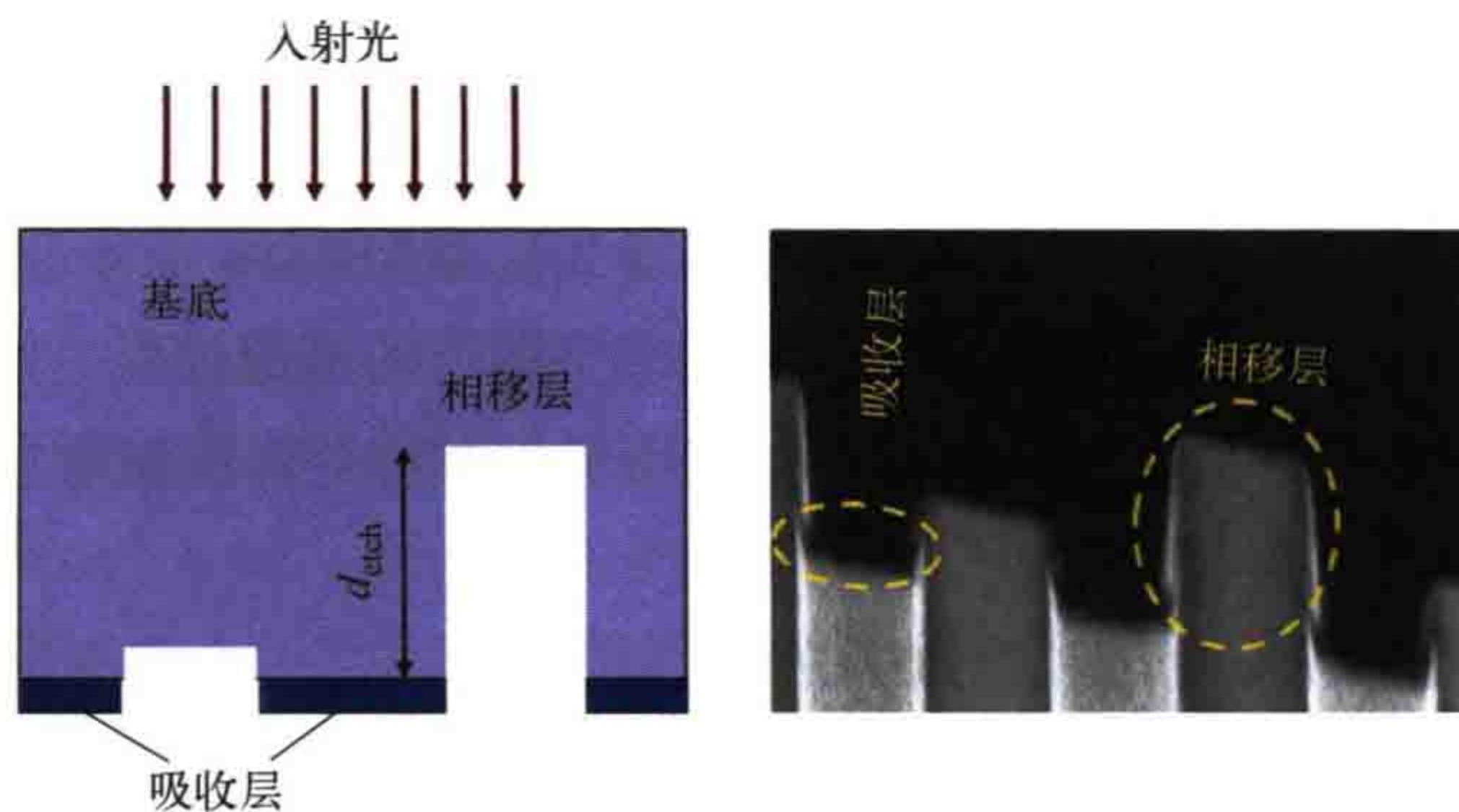


图 4.18 交替型相移掩模相邻透光图形相移量的物理实现方法示意图：理想的掩模形貌（左），加工完成后掩模的电镜图像（右）。转载自参考文献 [33]

如图 4.18 左图所示，掩模的制造工艺导致实际掩模图形偏离理想形状。此外，玻璃基底中沟槽的垂直边缘对光的散射效应会引入一些现象。这些现象在 2.2.1 节的薄掩模模型中没有描述。9.2 节将详细讨论这些效应。掩模的设计也必须考虑这些问题。图 4.18 右图为设计和制造的交替型相移掩模的电子显微镜图像。

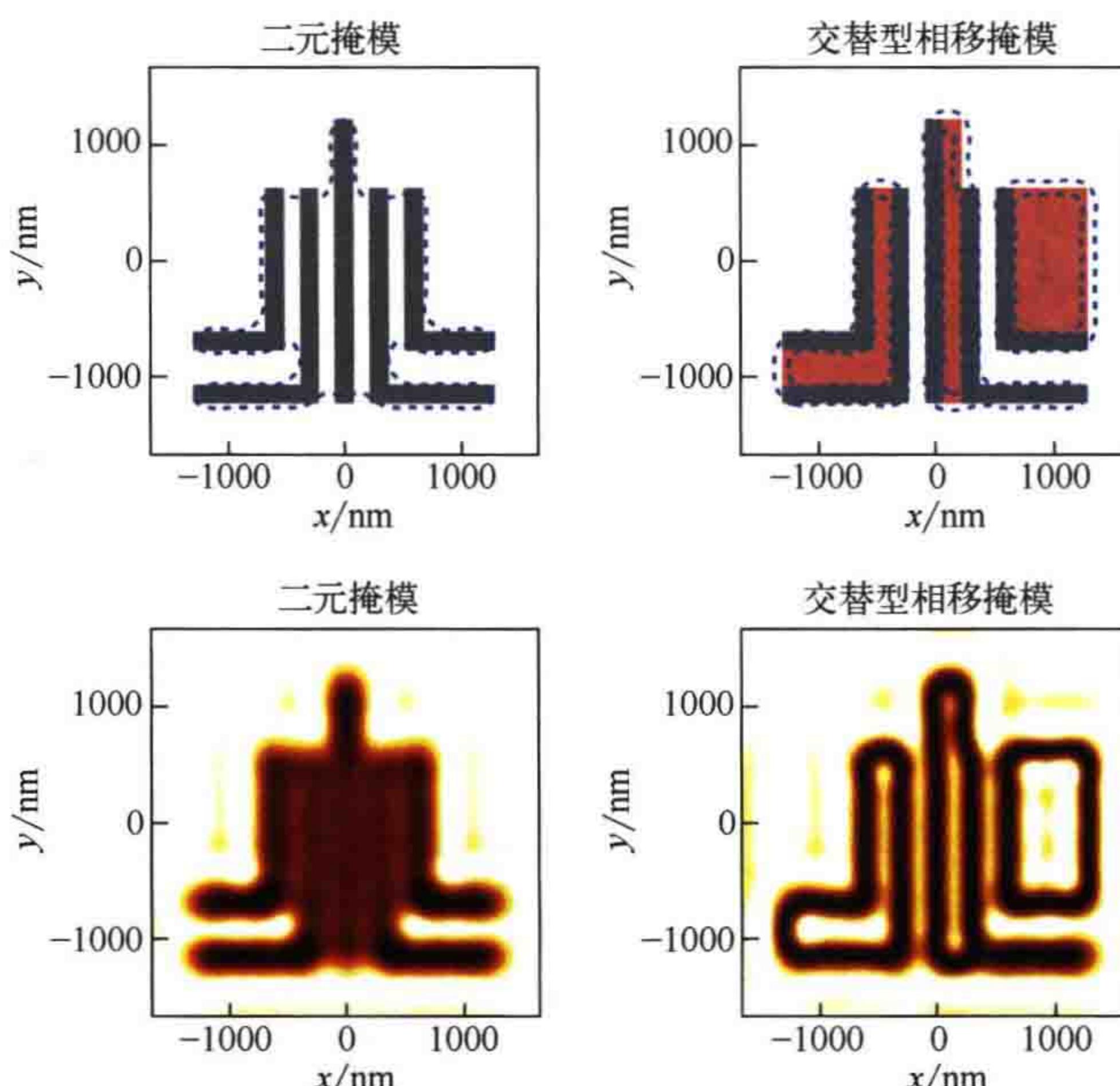


图 4.19 对示例的版图应用相移技术及其导致的设计冲突。第一行：二元掩模版图（左）与交替型相移掩模版图（右），以及仿真的光刻胶印迹（虚线）；白色 ($\tilde{T} = 1.0, \phi = 0^\circ$)、灰色 ($\tilde{T} = 0.0, \phi = 0^\circ$)，以及浅红色 ($\tilde{T} = 1.0, \phi = 180^\circ$) 区域表示掩模上不同等级的透过率。第二行：仿真的空间像强度。线条的宽度为 150nm。成像条件：波长 193nm，数值孔径 0.5nm，圆形照明 $\sigma=0.3$

相位冲突是交替型 PSM 设计面临的另一个难题。图 4.19 在前面讨论的掩模图形（见图 2.18）中增加了相移。由于 NA 较小，二元掩模（左列）的成像对比度很低。很难分辨与 y 方向平行的垂直线条。垂直线条区域看上去像一个未显影光刻胶的均匀区域。为了改善交替型 PSM 的问题，在每条垂直线的左右两侧都添加相反的相位，明显改善了垂直线的成像。在空间像和光刻胶印迹中都可以清楚地分辨出这些线条，如图 4.19 右侧所示。

然而，相移的引入同时也带来了一些新问题。掩模中相位值不同的透光区域必须以某种方式合理地连接起来。设计者可以自由选择连接的位置。两个相位值不同透光区域的过渡位置一般都会产生空间像最小光强，会形成一条光刻胶线条。因此，图 4.19 右侧 y 方向的垂直线被缺陷所包围：相邻线条的末端被沿着相移区边缘的多余线条连接在一起。

采用平滑的过渡将会减轻上述问题。然而这一方案实际不可行，原因如下。首先，具有多个相位值甚至相位连续变化的掩模的制造难度大且价格昂贵。此外，除 0° 和 180° 之外的相位值，沿着焦深方向的成像具有不对称性。导致的最佳焦面不对称会带来其他工艺问题。

采用修剪掩模^[35] 进行多次曝光是处理这些相位冲突问题的主要方法。用修剪掩模进行曝光去除了位于透光区相位变化位置的光刻胶线条。图 4.20 给出了一个具体实例。左上方设计目标中最微细的图形是两条垂直线条。因此，这些线条的左右两侧被分配了相反的相位值。目标版图上的其他图形尺寸较大，不是光刻关键图形。这些图形是由第一行中间所示的修剪掩模产生的。修剪掩模有两个功能：印出目标版图中底部和顶部尺寸较大的不透光图形，并避免细线条（相移掩模第一次曝光时产生）被再一次曝光。右图和中图为 PSM 和修剪掩模所成像的轮廓。图中所

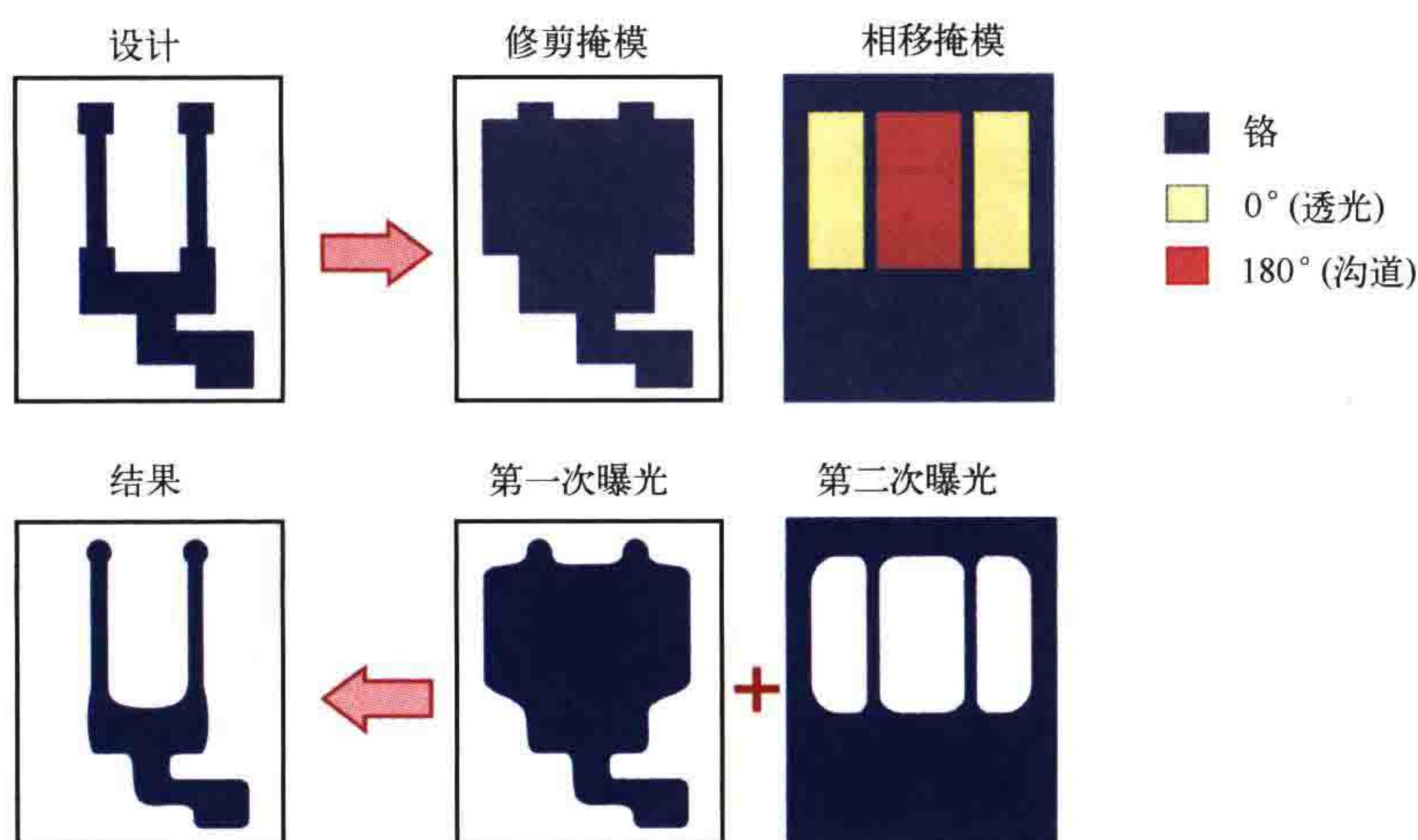


图 4.20 应用修剪曝光移除交替型相移掩模中的相位冲突。改编自参考文献 [36]

示为基于强度阈值计算出的轮廓。两次曝光之后得到左下角所示的轮廓，与目标版图非常接近。然而，这种工艺需要使用修剪掩模以及多次曝光，增加了交替型相移掩模技术的成本和复杂性，与其他解决方案相比缺乏吸引力。

上述关于相位冲突的讨论表明，由不同相位区域组成的全透射掩模同样可以在像面产生图形。这一思想被应用于无铬相移光刻（CPL）。无铬相移掩模是一种特殊的强 PSM，其所有区域都透光，但可对相位进行空间调制。

图 4.21 比较了不同类型掩模产生密集线图形的光学过程。第一行为掩模的几何结构及其对垂直入射光的衍射作用，从左至右依次为二元掩模、交替型 PSM 和无铬 PSM。无铬 PSM 由交替排列的全透明区 ($\tilde{T}=1$) 组成，相位值 $\phi=0^\circ / 180^\circ$ 。该图形的周期与图 4.21 中间的交替型 PSM 的周期相同。因此，第一级衍射级在同一位位置进入投影物镜光瞳。无铬掩模中无相移区 ($\phi=0^\circ$) 和相移区 ($\phi=180^\circ$) 透射光之间的相消干涉导致 0 级光的衍射效率为零。

图 4.21 的下半部分是不同类型掩模的空间像截面图。右图所示的图形线宽为 40nm、周期为 80nm，非常接近系统的分辨率极限。衍射级次的位置如左上图所示。二元掩模情况下，只有 0 级光穿过投影物镜，空间像强度为恒定值。交替型 PSM

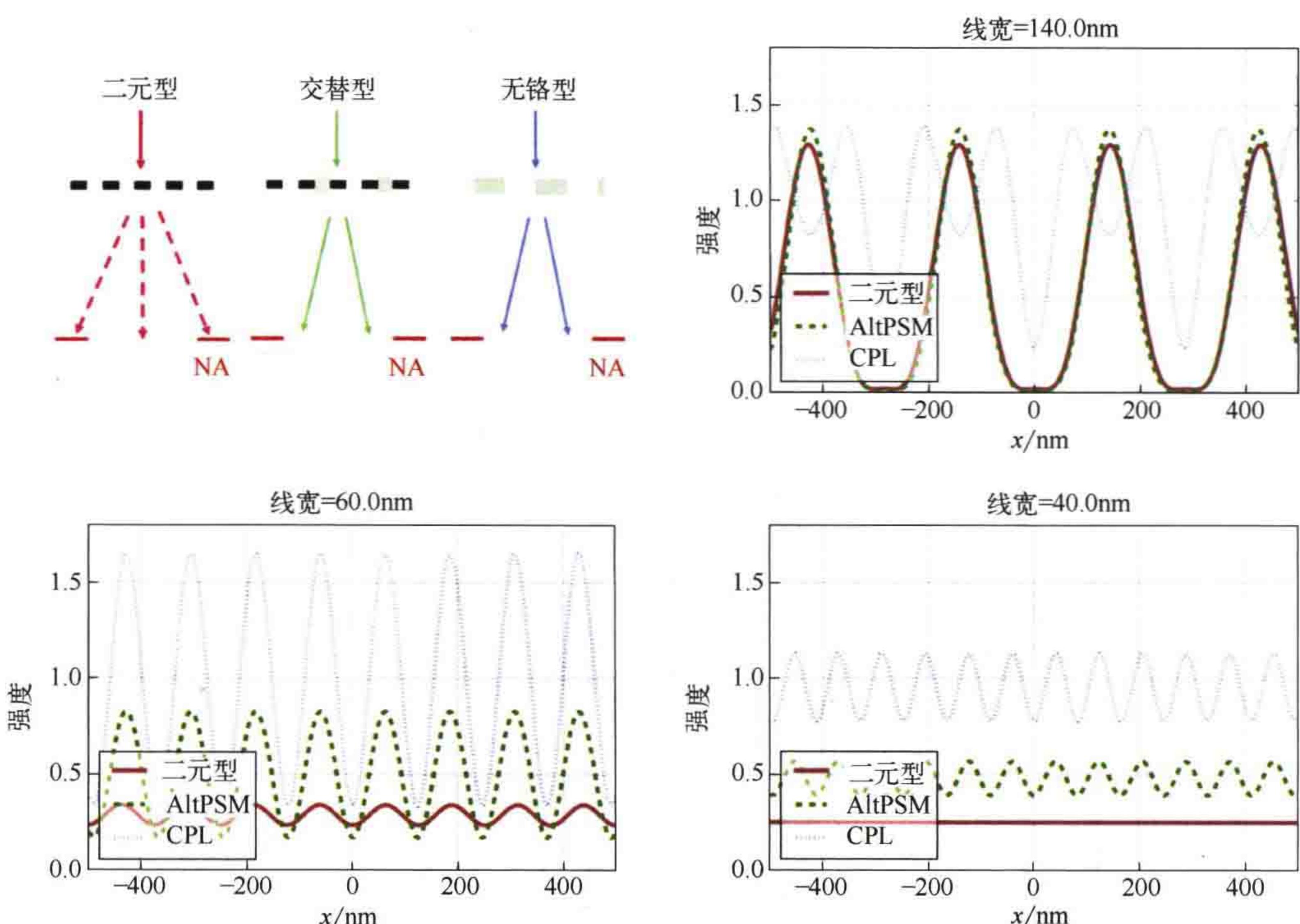


图 4.21 不同掩模类型的周期性线空图形之间的对比图。左上：衍射极限成像，包括二元掩模、交替型相移掩模（AltPSM）以及无铬相移掩模（CPL）对光的衍射。右上和第二行：不同线宽图形的空间像横截面图。线空图形的线空比为 1 : 1，波长为 193nm，圆形照明 $\sigma=0.3$ ， $NA=1.35$

和无铬掩模都有两个衍射级参与成像，产生了周期为目标值 80nm 的干涉条纹。该无铬掩模不含任何挡光的吸收层图形，所以像的强度高于交替型相移掩模的像强度。当特征尺寸为 60nm 或周期为 120nm 时，下一个衍射级次开始参与成像。这些新参与成像的衍射级对应为二元掩模的一级。因此，二元掩模的像的调制度较低，如左下图所示。与之相比，交替型 PSM 和无铬掩模的成像对比度更高。

通过增加掩模图形的线宽、周期和透过投影物镜光瞳的衍射级数可以看出交替型和无铬 PSM 之间的区别。交替型 PSM 空间像最小值对应的宽度取决于线宽。也就是说，交替型 PSM 可用于各种周期和线宽的图形的成像。相比之下，无铬 PSM 在相移区边界位置的成像光强最小，最小值两侧光强变化陡峭。透光区两侧的光强最小值不明显，无法曝光出图形。无铬 PSM 只能用于曝光比较细的线条。

无铬 PSM 光刻细线条的能力可以应用于制造某些特定的结构。半导体集成电路中晶体管的门通常是很细的半密集线或较长的接触孔。它们是半导体制造中最关键的结构，需要采用鲁棒性很高的微细图形光刻工艺。图 4.22 给出了无铬掩模上线条图形的空间像截面图。线条图形相移区的宽度不同。宽线条（宽度 $\geq 100\text{nm}$ ）的两条边成像为两条独立线条。细线条的边缘融合成为一个具有单一最小值的空间像。对于掩模上宽度为 $30 \sim 50\text{nm}$ 的相移线条，空间像的形状及其最小值几乎恒定。在这种情况下，光刻工艺具有很高的鲁棒性，对掩模尺寸的微小偏差不敏感。无铬掩模的掩模误差增强因子（MEEF）很小。

无铬相移掩模可以避免相位冲突，这是其另一个优点。硅片上的一条线条是由掩模上的两条相邻边产生的，两条边在线条末端连接在一起。但是，无铬相移掩模的制造和检测难度很大。形成掩模图形的材料仅有一种，常采用刻蚀工艺制作相移区，刻蚀工艺的控制难度很大。由于检测需要用到（不同形式的）材料的对比度信息，所以这些检测设备难以检测有图形掩模。薄掩模模型只能近似地描述无铬掩模的散射光。设计这种掩模时需要采用严格电磁场仿真技术。严格电磁场仿真技术可以量化计算非常重要的三维掩模效应及其对成像的影响，参见 9.2 节。

4.3.2 衰减型相移掩模

与强 PSM 不同，弱 PSM 或衰减型 PSM 没有相位不同的全透光区域。这种类

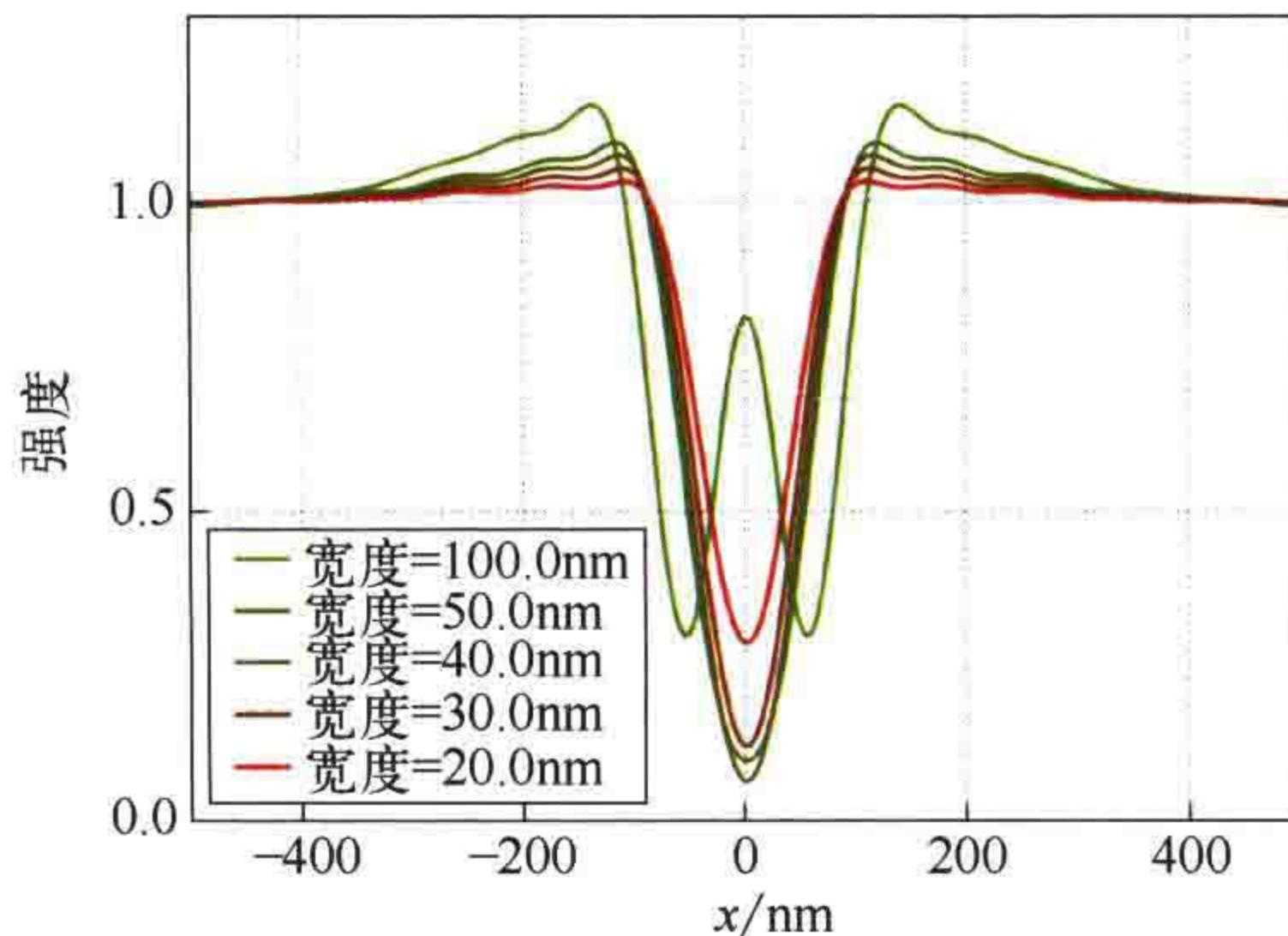


图 4.22 无铬相移掩模上不同宽度线条的空间像截面图。成像条件：波长 193nm，圆形照明 $\sigma=0.7$ ， $\text{NA}=1.35$

型的相移掩模采用的是半透明相移层，具有非零背景光强。一般将光强透过率 \tilde{T} 定义为透过率。在后续公式中，本书也会采用振幅透过率 τ 进行定义。两个量之间的关系为 $\tilde{T} = \tau^2$ 。

与掩模的全透光区相比，衰减型 PSM 的半透光区存在 180° 相移。衰减型 PSM 的透过率对成像性能的影响取决于版图。为了证明这一点，在有相移和无相移两种情况下，我们研究了具有给定背景光强透过率 \tilde{T}_b 、线宽 w 和周期 p 的线空图形的成像。掩模周期范围 $-p/2 \leq x \leq p/2$ 内的透过率函数 $\tau(x)$ 为：

$$\tau(x) = \begin{cases} \tau_b, & |x| \leq w/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4.13)$$

将 $\tau(x)$ 代入傅里叶变换公式，可以得到 0 级和 m 级衍射光的衍射效率 $\eta_{0,m}$ 表达式：

$$\eta_0 = \frac{1}{p^2} [w - \tau_b(w - p)]^2 \quad (4.14)$$

$$\eta_m = (1 - \tau_b)^2 \left(\frac{w}{p} \right)^2 \operatorname{sinc}^2 \left(m \frac{w}{p} \right) \quad (4.15)$$

图 4.23 为不同 \tilde{T}_b 和不同相移量情况下式 (4.15) 的曲线图。分别显示了 180° 相移 $\tau_b = -\sqrt{\tilde{T}_b}$ 和无相移 $\tau_b = +\sqrt{\tilde{T}_b}$ 情况下的衍射效率数据。可见 \tilde{T}_b 和相移对衍射效率有明显的影响。 180° 相移提高了 1 级光的衍射效率，降低了 0 级光的衍射效率。这说明通过调节 \tilde{T}_b 和相移量的大小可以平衡各个衍射级次的强度。衰减型相移掩模的典型吸收层为 68nm 厚的 MoSi 层，光强透过率 $\tilde{T}_b = 0.06$ ，波长为 193nm，对应的相移量为 180° 。MoSi 衰减型相移掩模是先进 DUV 投影光刻中最常用的掩模。

强相移掩模常需要采用位于光轴上的相干照明。与之不同，衰减型相移掩模常与离轴照明组合使用。利用优化后的离轴照明对密集线空图形进行成像，成像质量取决于 0 级光与 +1 级光或者 -1 级光形成的干涉条纹的对比度。图 4.23 右图显示了该对比度数据。相移为 180° 、光强透过率 $\tilde{T}_b = 0.06$ 时最关键的密集线图形 ($w/p=0.5$) 的成像对比度最高。

在其他类型图形的成像中也可以观察到可透光背景和相移在平衡各衍射级光强和成像方面的作用。图 4.24 为背景光强透过率对孤立接触孔的空间像、像的横截面和工艺窗口的影响。名义不透光区（背景）的光强透过率 \tilde{T}_b 自上而下逐渐增大。图中相移量均为 180° 。

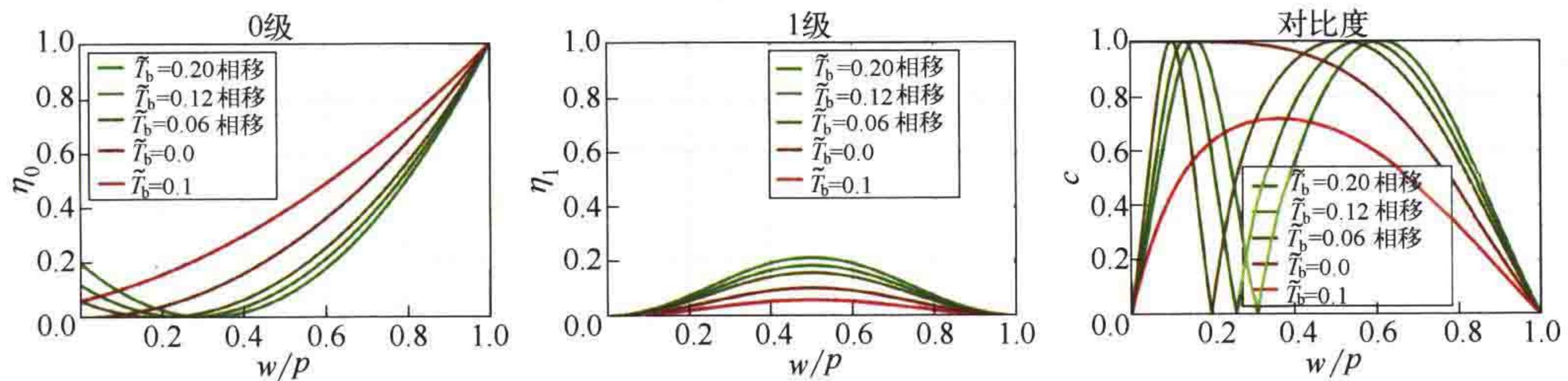


图 4.23 不同背景光强透过率 \tilde{T}_b 条件下 0 级 (左) 和 1 级 (中) 光的衍射效率 $\eta_{0,1}$ 随着宽度与周期比值 w/p 的变化, 相移量为 180° 。右图: 两衍射光之间的干涉对比度 c 随 w/p 的变化关系

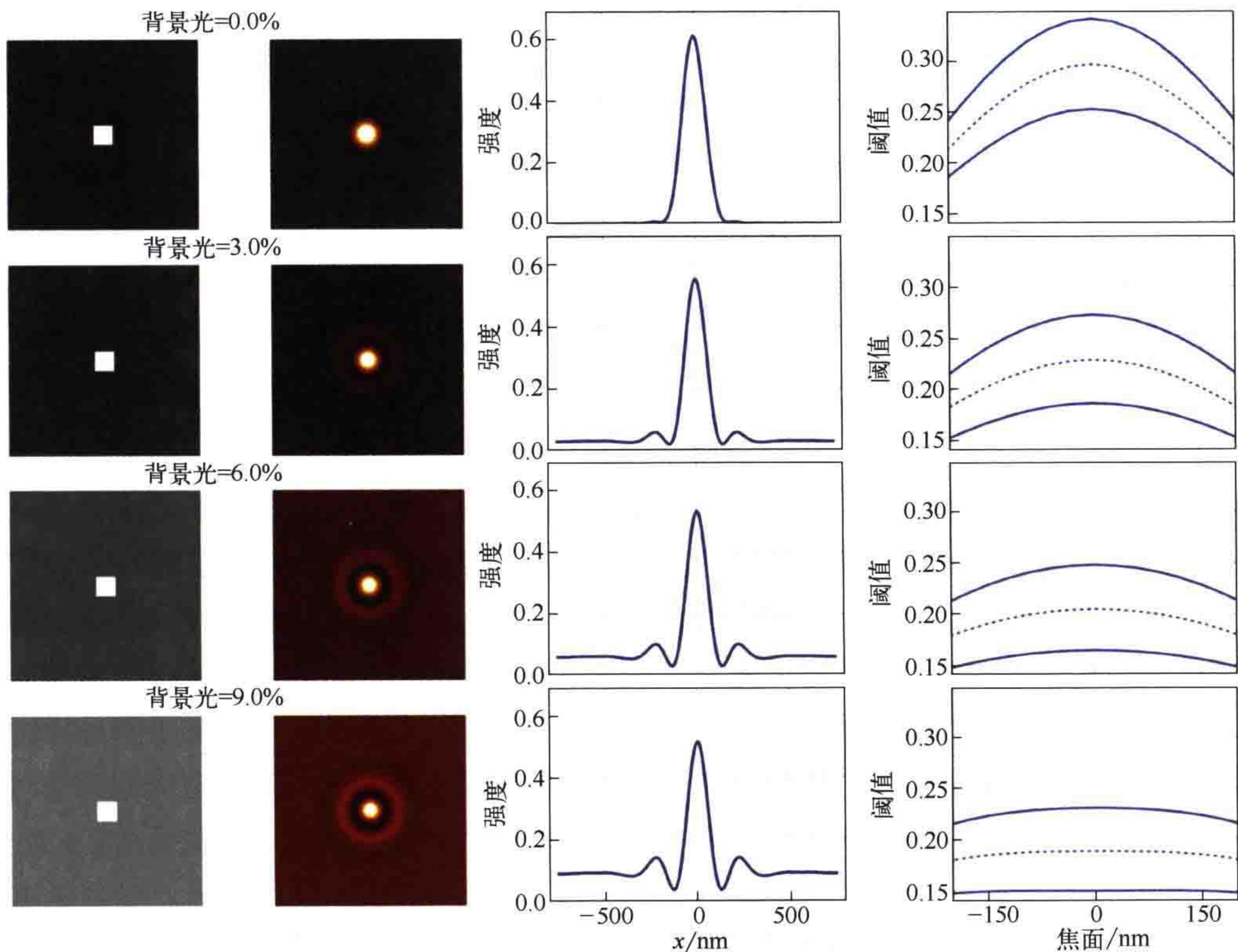


图 4.24 不同背景光强透过率情况下相移掩模 150nm 宽孤立接触孔图形的成像。每一列依次为：掩模版图、空间像、过接触孔 0 点的空间像水平向横截面图、工艺窗口。每一行依次为：相移区的透射率分别为 $\tilde{T}_b = 0\%$ 、 $\tilde{T}_b = 3\%$ 、 $\tilde{T}_b = 6\%$ 、 $\tilde{T}_b = 9\%$ 。成像条件：
波长 193nm，圆形照明 $\sigma=0.7$, NA=1.35

较大的 \tilde{T}_b 增加了名义暗区内像的强度。接触孔中心的亮斑被暗环包围。穿过接触孔中心的光与经过掩模名义暗区相移之后的光之间发生相消干涉形成了暗环。接触孔周围的暗环改善了掩模边缘附近的空间像斜率，增强了空间像对焦面变化的鲁棒性。这一点可以在空间像横截面图和工艺窗口中观察到。除了暗环外，在名义

暗区域内还可以观察到一个亮环或旁瓣。名义暗区的透过率增加了产生可印出旁瓣的风险。旁瓣印出的风险取决于掩模的几何形状和照明设置。一般来说，相干度更高的照明和周期为中等大小的图形对旁瓣印出最敏感^[37, 38]。减少旁瓣印出的策略包括在（可能的）旁瓣印出位置添加吸收层结构^[39]或添加透光散射图形^[40]。旁瓣的检测和抑制是现代掩模设计、OPC 和光源掩模优化（SMO）的必要组成部分，参见 4.5 节。

衰减型 PSM 改善了接触孔和空图形等孤立透光图形的工艺窗口。将离轴照明与掩模衍射谱的加权修正技术相结合，还可以增大其他图形的工艺窗口。确定衰减型 PSM 的最佳透过率时一般需要在成像特性（对比度、NILS、工艺窗口）和设计复杂度（特别是旁瓣印出风险）之间进行折中。旁瓣印出的风险随着背景透过率的增大而增加，当投影透镜存在某些波像差时印出风险变得更高，请见 8.1.5 节。

MoSi 衰减型 PSM 的制造工艺与标准二元掩模（玻璃上铬）的制造工艺相似。需要特别注意控制吸收层的透过率和相位。为实现 180° 相移以及所需的透过率，需要采用特定的折射率 n 、消光系数 k 和厚度参数组合。

4.4 光瞳滤波

通过操控穿过投影透镜的光的透过率和相位，也可以改善投影系统的成像性能。透过率滤波器改变了不同傅里叶成分对成像的影响。一些学者考虑将这种滤波器应用于光刻投影物镜，实现物镜成像性能的调控^[41-43]。图 4.25 显示了高斯滤波器和反高斯滤波器的透过率分布。为了便于讨论滤波导致的成像效应，本书采用部分相干因子 σ 值较小的圆形照明进行研究。这种情况下，高斯滤波器增加了穿过投影光瞳中心的低空间频率分量的权重，而反高斯滤波器增加了靠近光瞳边缘的高空间频率分量的权重。

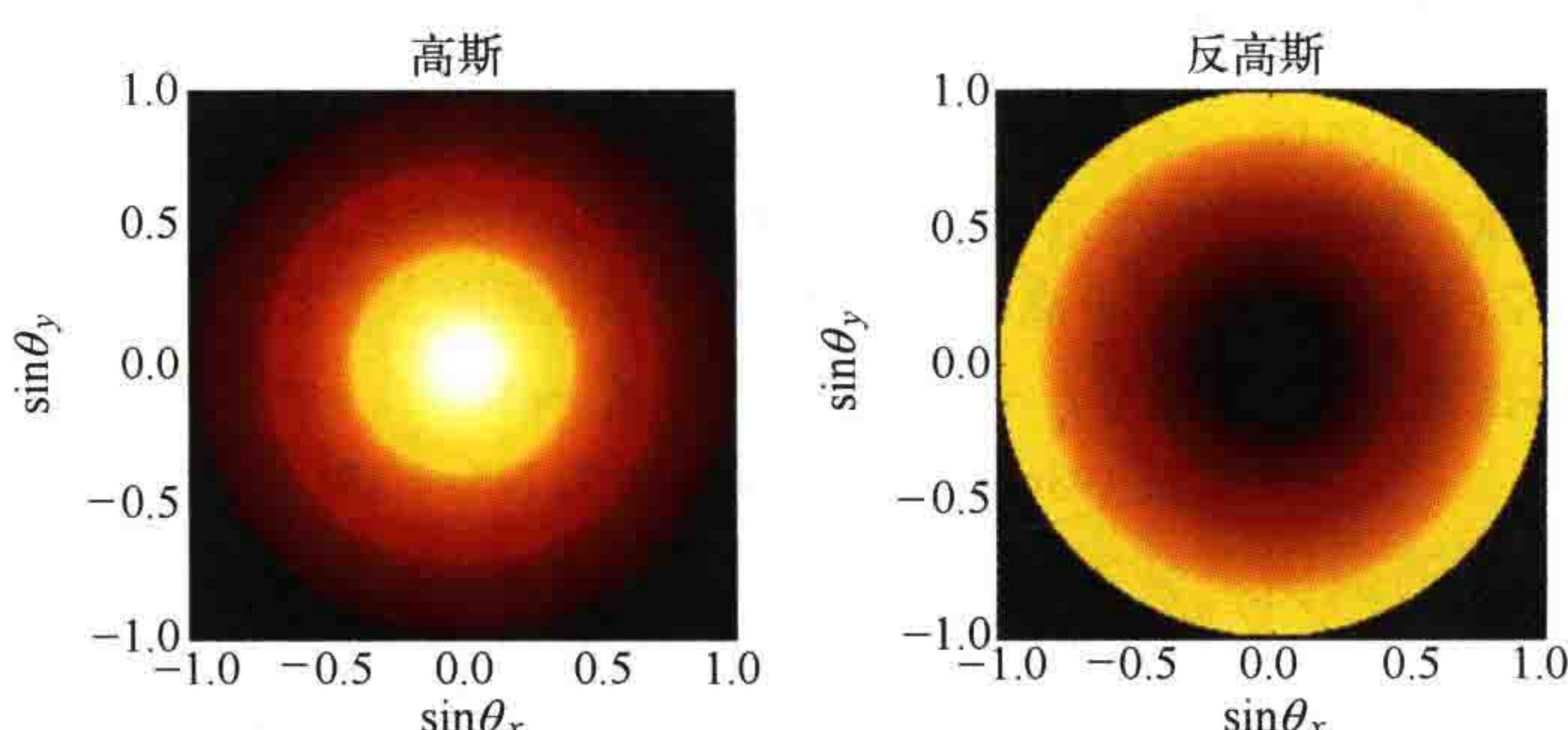


图 4.25 高斯光瞳（左）和反高斯光瞳（右）滤波器示例。透过率在最小值（暗）和最大值（亮）之间连续变化

图 4.26 给出了 45nm 孤立空图形的仿真空间像截面图。分别为不含光瞳滤波和使用了高斯滤波器和反高斯滤波器情况下的截面图。这两种滤波器都降低了透射光与像的强度。损失的光被投影系统内部的光瞳滤波器吸收。系统吸收光产生的热效应会导致不可控的波像差和其他畸变。Smith 和 Kang^[44] 建议在掩模保护膜上安装光瞳滤波器。掩模保护膜是一层薄薄的保护层，与掩模图形的距离约为 6mm。

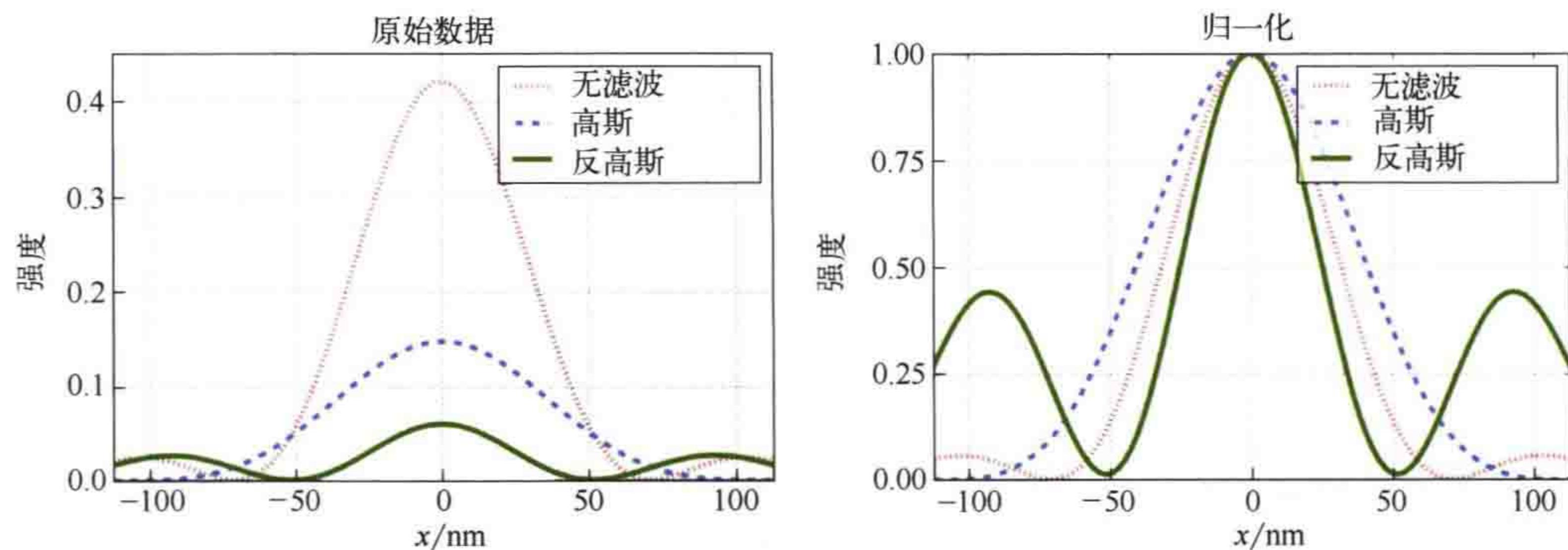


图 4.26 有无空间滤波情况下，45nm 孤立空图形的空间像横截面图。空间滤波器如图 4.25 所示。左图中的原始数据生成过程中采用了能量归一化方法。右图的数据采用了最大值归一化。成像条件：波长 193nm，NA=1.35，圆形照明 $\sigma=0.3$ ，最佳焦面

为了比较有无滤波器情况下的空间像截面图，图 4.26 右图对数据进行了归一化。反高斯滤波器对高衍射级的加权越大，在目标图形附近的空间像斜率就越大。较大的 NILS 可增加曝光剂量裕度。但是，主图形的旁瓣同时也变得更强，增加了旁瓣印出的风险。高斯型光瞳滤光器的效果与此相反。它们降低了旁瓣的强度，但同时也降低了 NILS 和曝光剂量裕度。

图 4.27 说明了光瞳滤波器对焦深方向成像的影响。与无光瞳滤波器的情况相比，高斯光瞳滤波器提高了焦深方向的成像稳定性或者说增大了焦深 (DoF)。反高斯滤波器的效果与之相反。

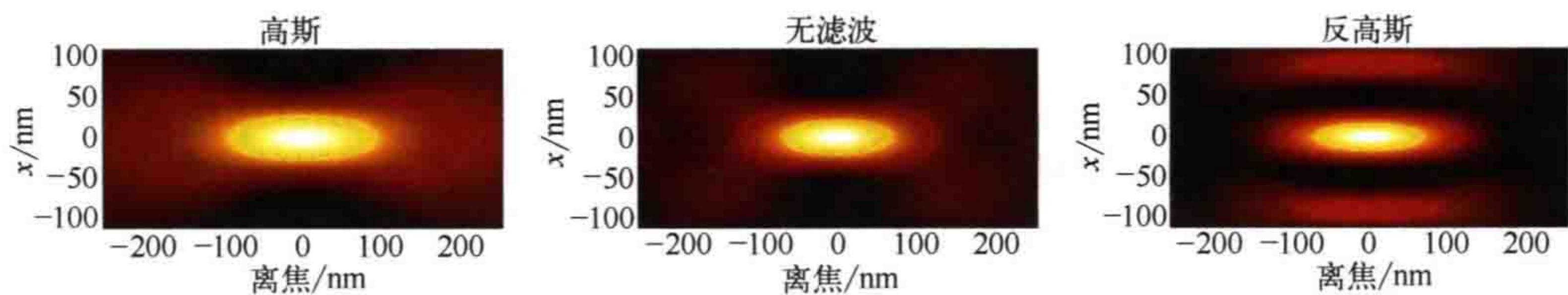


图 4.27 有无空间滤波情况下，45nm 孤立空图形沿焦深方向的像。所有参数同图 4.26

通常，可以设计光瞳滤波器以调节成像系统的成像特性。然而，光学系统内光的吸收及其导致的像差效应，限制了光瞳滤波器在实际生产中的应用。

先进的投影光刻机中使用了一种特殊形式的可调谐相位滤波器或波前调制器。参考文献 [45] 描述了 ASML 浸没式光刻机 FlexWave™ 调制器的工作原理及其各种应用场景。FlexWave 用于静态和动态像差控制，特别是用于透镜热效应和光刻工艺波动的补偿，例如不同光刻机之间的成像特性不一致，以及照明系统和投影物镜生命周期内的光源形状和切趾效应波动。尼康采用了动态变形镜，通过反射镜表面复杂的形状变化控制投影物镜波前^[46]。这种波前调制器还可以用于光源、掩模和投影物镜波前的优化，以补偿掩模引起的像差效应^[47]。

4.5 光源掩模优化

前几节讨论了照明光源和掩模对分辨率和光刻工艺性能的影响。最佳照明模式和掩模图形几何形状不是相互独立的。例如，交替型 PSM 需要采用部分相干因子 σ 很小的相干照明。使用二极照明或其他形式的多极照明等强离轴照明，二元或者衰减型相移掩模上周期图形的成像质量更高。问题出现了：哪一种光源形状和掩模图形的组合成像性能最佳？在多模态搜索空间中，最佳光源、掩模和参数的确定是一个病态的、复杂的优化问题。解决这一问题需要利用恰当的设计参数、目标函数和优化技术，并将它们与计算高效、准确的模型一起使用。

采用的技术方案和建模方法决定了光源 s 和掩模 m 参数的描述方法。4.1 节介绍了环形照明和多极照明等几种典型参数化光源的形状，以及实现客户化自由照明的方法。标准掩模由多边形吸收层图形组成。像素化掩模^[48] 提供了更大的优化自由度，但掩模刻写时间更长，并且难以检测潜在的掩模缺陷。掩模形貌和材料可以作为额外的优化参数^[49]。通常，光源 s 和掩模 m 参数的物理约束条件不同。这些约束用于保证优化后光源和掩模的可制造性。

光源掩模优化（SMO）和反向光刻技术（ILT）中定义评价函数的方法有很多。图 4.28 的左上方为目标图形，由 100nm 光刻胶线条排列组合而成，理论上可由“理想”的光刻曝光和工艺产生。但是由于采用了衍射受限光学元件，实际不可能形成理想的像。右上方为在一定的光源 s 和掩模 m 参数设置下获得的衍射受限像。显然，该像与目标图形只是相似，并不完全相同。如何评价像和目标图形之间的相似性？

像与目标图形之间的差异如图 4.28 左下所示。差异的最大绝对值出现在目标版图的拐角和边缘位置。目标图形左下方的两条线之间的距离很近，差异也比较大。

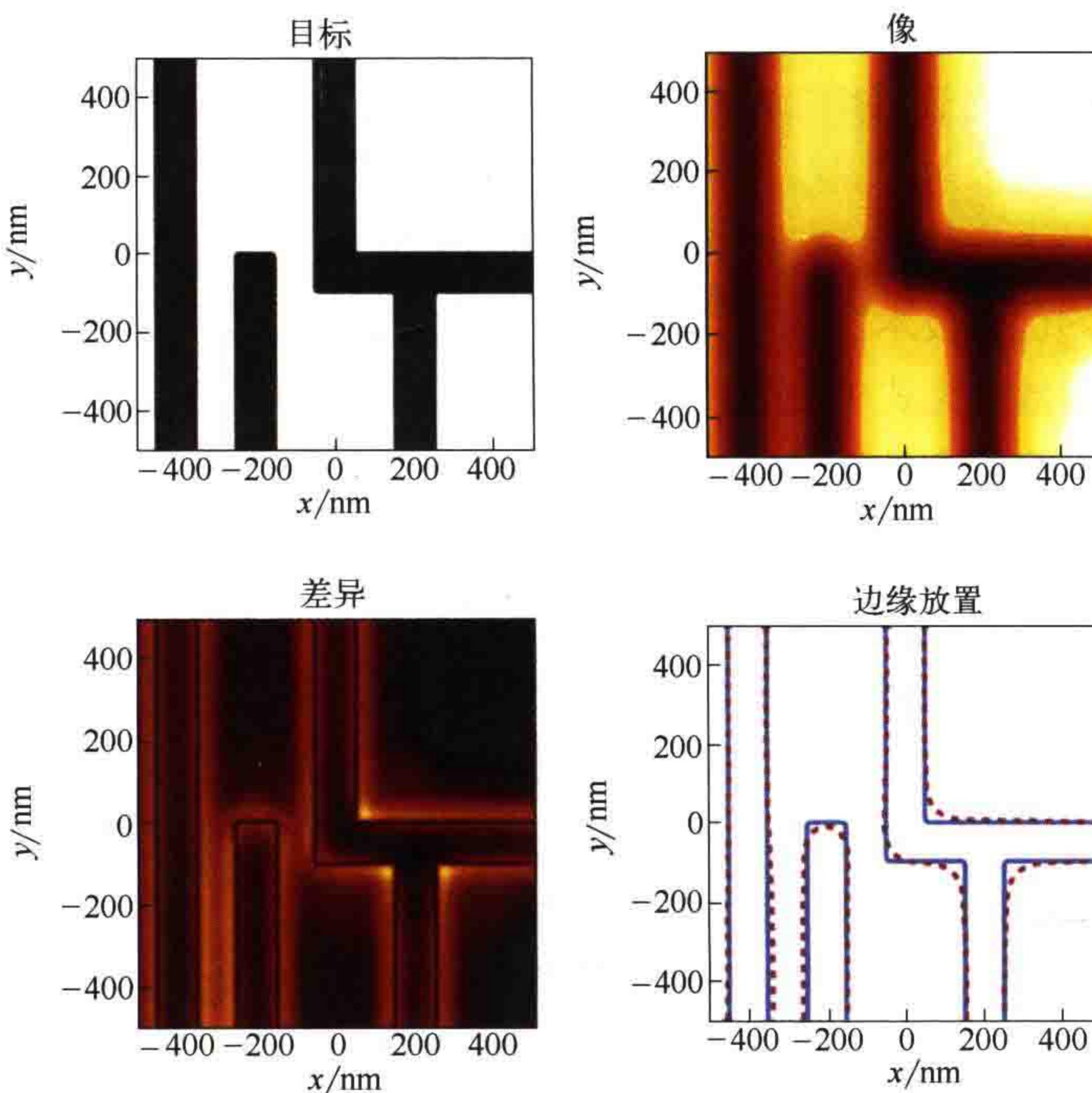


图 4.28 SMO 与 ILT 的成像效果评估。左上：目标（100nm 光刻胶线条组成的图形）。右上：与目标相似的衍射受限像。左下：目标和像之间的差异。右下：像的印迹（虚线）和目标（实线）

为了将像的相似度或保真度转换为标量值，将一定光源和掩模设置条件下的像 $I_{i,j}(s, m)$ 和目标图形 $\tilde{Z}_{i,j}$ 之间的差异 \tilde{d} 表示为：

$$\tilde{d} = \sum_{i,j} |I_{i,j}(s, m) - \tilde{Z}_{i,j}| \quad (4.16)$$

式中， i 和 j 分别表示像和目标图形的离散采样点。由于成像系统的衍射受限性， \tilde{d} 的值总是大于 0。这种图像保真度定义将像的非关键区域的微小强度波动赋予了更大的重要性。衍射效应或亚分辨率辅助图形导致的小旁瓣不会转移到光刻胶图形上。虽然也可以在不同焦面位置计算式 (4.16) 所示的评价函数，但它对光源 s 和掩模 m 的光刻工艺性能的评价能力有限。

目标图形与图 4.28 左下方图形的印迹不受像 $I(s, m)$ 非关键区域强度微小波动的影响。图中印迹边缘放置误差的均值或最大值可作为像和目标图形之间相似性的一种有益度量。NILS、工艺窗口、MEEF 等光刻像质评价参数从更多的角度评估光源 s 和掩模 m 的优劣。

简单的 SMO 和 ILT 使用如式 (4.16) 所示的图形误差等单一评价函数。应用各种正则化方法获得实际可制造的光源和掩模图形。例如，可制造的掩模只包含两个（有时为三个）不同的透过率 / 相位值。为使掩模刻写时间在合理范围之内，且

便于利用现有检测设备进行掩模检测，掩模上几何图形应该越少越好。大多数情况下，会将不同评价函数采用加权叠加的方式组合在一起使用。一些先进 SMO 算法采用多目标优化技术在不同目标函数之间进行折中^[50]。

SMO 和 ILT 采用的优化技术和策略非常相似。Poonawala 和 Milanfar^[51] 提出了基于梯度搜索的优化技术。他们将成像过程描述为输入掩模图形与二维高斯核的卷积，使用 S 型函数〔见式（3.22）〕将空间像转化为光刻胶图形。利用这种模型，可直接应用最速下降法高效地计算透过率连续的最佳掩模。最后，采用阈值化和形状修复操作将得到的灰度掩模转换为可制造的二元掩模。Poonawala 最初的技术方案仅限于空间非相干系统，不能优化光源。为了在优化过程中考虑其他效应，Ma 等人^[52-54] 对基于梯度的算法进行了扩展，并利用这种算法同时优化光源与掩模。

水平集算法为形状和拓扑优化问题提供了非常灵活的公式^[55]。Pang 等人^[56] 演示了基于水平集的优化方法在反向光刻技术（ILT）中的应用效果。文献[57, 58] 详细描述了水平集方法及其在 ILT 中的各种应用。

一些重要的 SMO 技术从空间频率的角度进行两步优化^[59, 60]。第一步确定掩模衍射谱和照明光方向的最佳组合，获得高质量空间像。第二步确定可产生相应衍射谱的掩模图形。将这种方法扩展应用到所谓的 tau 矩阵，可以将形貌效应（3D 掩模效应）增加到像素化无铬相移掩模的优化中^[61]。

为了高效、解析地计算梯度，大多数 ILT 和 SMO 技术的模型和目标函数需要有明确的数学表达式。需要避免优化陷入高维搜索空间的局部极小值。遗传算法等进化算法克服了传统优化方法的不足，可作为备选算法^[50, 62]。图 4.29 给出了一个简单 SMO 实例，采用了空间像仿真和遗传算法^[62]。实例的目的是利用波长 193nm、数值孔径 0.7 的光刻系统制造 140 ~ 170nm 的接触孔，并获得最大焦深。采用相同的照明模式对孤立和链状接触孔图形进行曝光。

图 4.29 左上方的照明模式类似于几个极的组合，可支持这两种图形的成像。掩模图形由接触孔组成。接触孔位于掩模中心，周围为辅助图形。成像和 CD 数据表明，优化后照明和掩模的光刻性能良好。

光源掩模优化、反向光刻与多重图形技术相结合（见第 5 章）可实现最大程度的分辨率增强，将 193nm 波长的高 NA 浸没式光刻推向其物理极限。除此之外，通过对版图中的关键结构的设计图形进行调整^[63]、对目标设计进行其他调整，可进一步解决光刻工艺窗口缩小的问题。实际应用中光学邻近效应修正（OPC）、反向光刻技术（ILT）和光源掩模优化（SMO）需要用到多种模型，并需要利用大量数据标定这些模型。可以预期，人工智能的发展，特别是卷积神经网络（CNN）和生成对抗网络（GAN）的发展，将彻底改变未来的 OPC、SMO 和 ILT^[64, 65]。用于 EUV 光刻的 SMO 和 ILT 面临一些新挑战，这方面已有大量的研究工作^[66]。

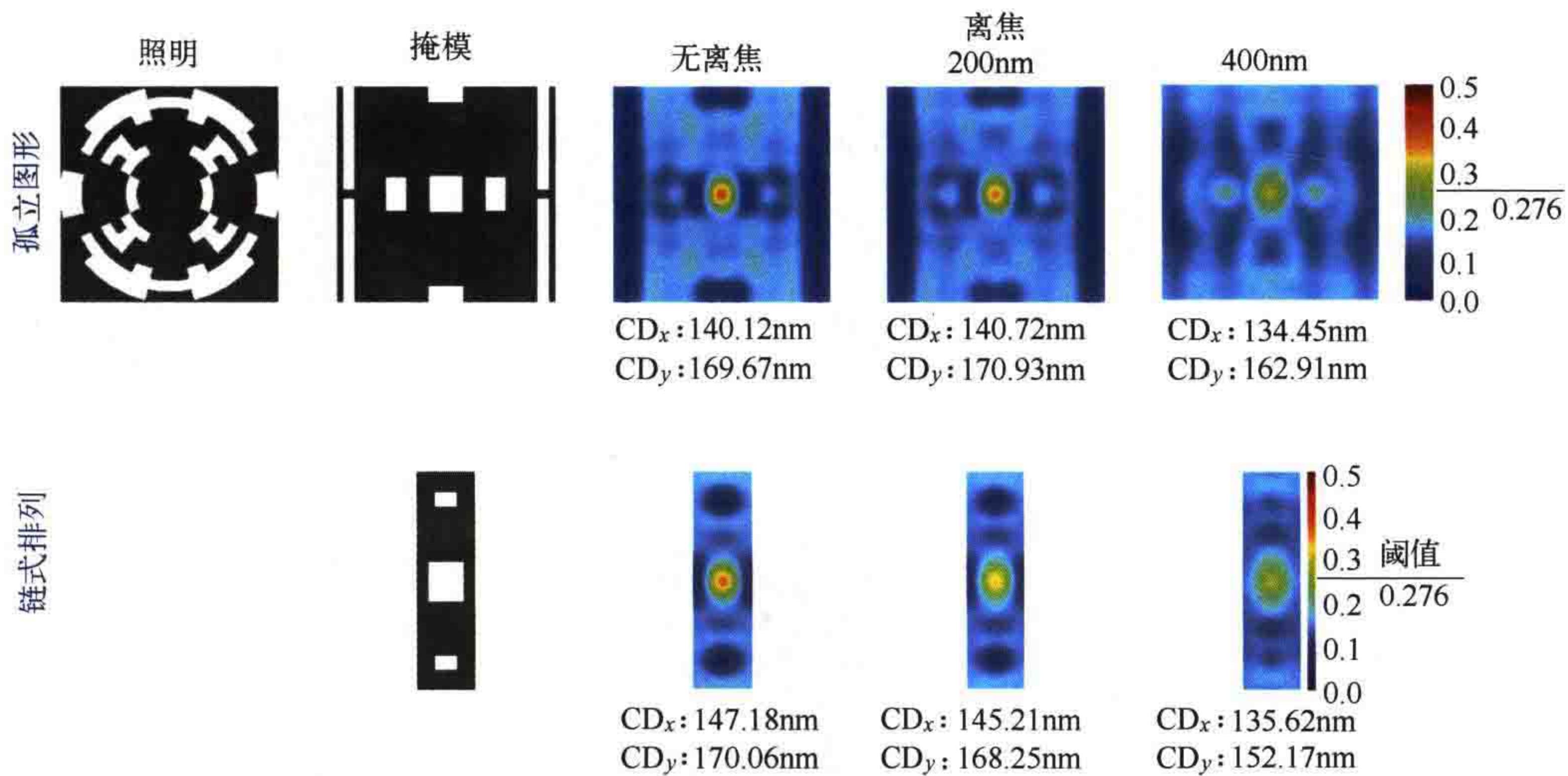


图 4.29 孤立图形（第一行）和链式排列（第二行）的接触孔的光源掩模优化结果。接触孔尺寸为 $140\text{nm} \times 170\text{nm}$ 。自左至右：照明模式，掩模图形，0nm、200nm、400nm 离焦面位置的空间像。
成像条件：波长 193nm，NA=0.75。更多细节请见参考文献 [62]

更多关于 SMO 和 ILT 的讨论超出了本章的范围。感兴趣的读者可参考参考文献中 Granik^[67] 和 Lai^[68] 的综述文章以及 Tim Fühner^[50] 的博士论文。

4.6 多重曝光技术

一些光学分辨率增强技术仅对特定图形有效。例如，采用方向合适的二极照明可以提高密集线空图形的成像性能。但是，不同方向的线空图形需要不同方向的二极照明。通常，适用于孤形单形成像的照明会倾向于覆盖更多的入射角，包括轴上照明（入射角为 0° ）。将掩模图形分解为不同的子图形，在特定照明模式下对每个子图形进行成像，通过这种方法可以研究掩模和照明配置的好坏。

这种研究方法如图 4.30 所示。左上方为掩模版图，由三个同心框组成，每个框由 45nm 宽的空图形构成。采用 CQuad 照明对掩模成像，每个框的成像对比度都很低，框图形边缘位置的像的强度存在明显变化。为了研究适用于线空图形成像的二极照明的优势，掩模被拆分为水平向和垂向的空图形。图 4.30 左下和中间为相应方向二极照明条件下的成像结果。图右下角为两个像的叠加，代表利用上述掩模和照明模式进行两次曝光形成的像。框图形水平和垂直边缘的成像对比度明显得到了改善。对两个子掩模进行光学邻近效应修正可以优化框图形拐角处的成像质量。

设计集成电路版图时也需要考虑双重曝光技术带来的约束。IDEAL（先进光刻新型双重曝光）首先曝光密集线空图形，然后曝光孤形单形，将两次曝光相结合实

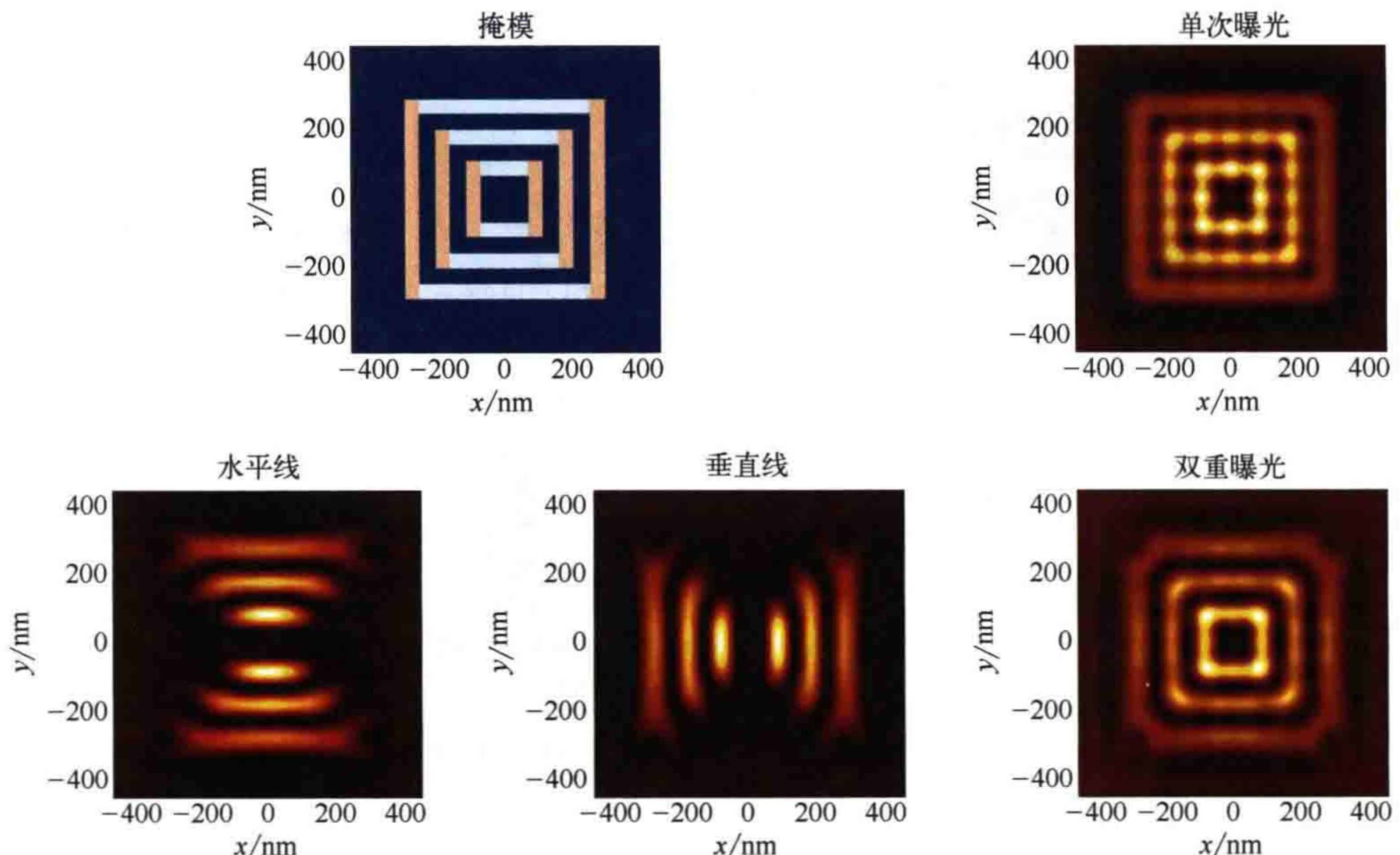


图 4.30 双重曝光技术在同心框图形成像中的应用。左上：掩模版图，不同颜色的亮图形为双重曝光中应用的子掩模。右上：CQuad 照明条件下单次曝光成像。左下： x 方向二极照明条件下 y 方向空图形子掩模的成像结果。下中： y 方向二极照明条件下 x 方向空图形子掩模的成像结果。右下：两次曝光成像的叠加。成像条件：波长 193nm，NA=1.35， $\sigma=0.69/0.89$ ，张角为 40°

现逻辑门图形的高对比度成像^[69]。将基于双二极照明的多重曝光技术应用于 45nm 节点器件图形，可以大幅改善工艺窗口^[70]。4.3.1 节已给出了一些多重曝光的例子。将修剪掩模曝光与交替型相移掩模曝光相结合，可解决 PSM 的相位冲突问题（见图 4.20）。

利用两个相互正交的线空图形和负胶进行高对比度双重曝光，可制作接触孔阵列^[71]。这是双重曝光技术的另一个重要应用。

上述所有多重曝光技术都只需采用标准的光刻胶材料，不需要利用光学材料的非线性。单次曝光时掩模上是完整的设计图形。多重曝光技术将单次曝光结果相叠加来提高成像质量。但是，当工艺因子 k_1 低于理论极限值 0.25 时，不能采用多重曝光技术对密集图形阵列进行成像（见 5.1 节和 5.2 节的讨论）。

使用相同的掩模和照明设置在不同离焦位置进行多次曝光，可以提高工艺在焦深方向的稳定性。这一思路在 FLEX（焦面裕度增强曝光）^[72] 等多焦面曝光技术中得到广泛应用。图 4.31 解释了 FLEX 的基本原理。前三行为 0.5μm 孤立接触孔图形在不同焦面位置的仿真空间像。焦面的采样间隔为 1μm。各行空间像按照最佳焦面位置相对名义像面位置的距离进行编号（如各行左侧所示，各行编号不同）。图顶部的竖直虚线所示为名义位置。第二行空间像序列的最佳焦面位置与名义像面位

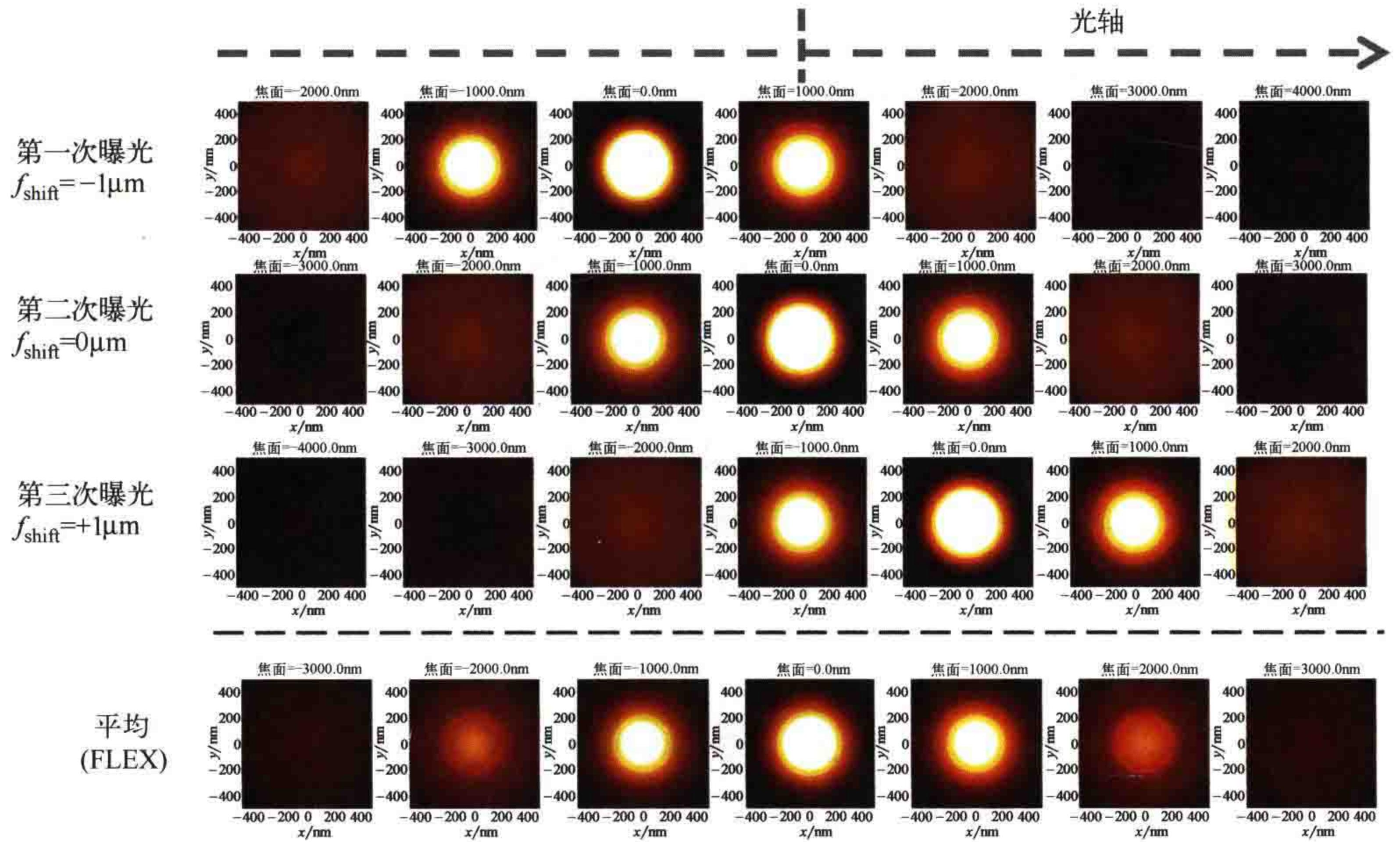


图 4.31 多焦面曝光技术的原理。 $0.5\mu\text{m}$ 宽孤立接触孔图形沿着光轴方向的仿真空间像。

第一行~第三行：相对于理想像面（顶部的水平虚线）焦面平移量为分别 $-1\mu\text{m}/0\mu\text{m}/1\mu\text{m}$ 的单次曝光成像。第四行：前三行单次曝光成像的线性叠加。成像条件：波长 365nm ， $\text{NA}=0.42$ ，圆形照明 $\sigma=0.5$ 。成像参数设置见参考文献 [72]

置一致。第一行和第三行的最佳焦面位置分别向左和向右移动了 $2\mu\text{m}$ 。最底部一行空间像是前三行空间像的线性叠加。显然，与单次曝光相比，叠加后的像沿着光轴方向的变化更小，焦深更大。

FLEX 方法虽然改善了焦深，但是对焦面进行平均时降低了成像对比度（特别是对于密集图形）和像的强度（特别是对于孤立的透光图形）。各单次曝光之间的最佳焦面偏移量取决于图形的类型和大小。光刻机工作过程中通过将工件台轻微倾斜，或者微调曝光光源的带宽（结合投影物镜的波长特性^[73]）可以调整每次曝光时的焦面位置。

4.7 总结

利用光学分辨率增强技术将光学投影光刻技术推进到亚波长水平。离轴照明通过调整掩模上入射光的方向，使投影物镜有限大小的数值孔径能够收集到对成像重要的衍射级次。实际制造中可以采用环形照明、二极照明和四极照明等标准照明模式，以及用户自定义的自由照明模式。

光学邻近效应修正（OPC）技术通过修改掩模版图的几何形状补偿成像缺陷。

由于仅需使用标准的掩模材料和工艺，所以 OPC 早已是芯片制造的成熟工艺。日益复杂的 OPC 对掩模刻写和检测提出了更高的要求。相移掩模（PSM）通过修改掩模透射光的相位提高成像性能。衰减型 PSM 早已成熟。该类掩模特别有益于孤立图形和半密集图形的成像。交替型 PSM 和无铬 PSM 等强 PSM 对工艺的改进作用最明显。然而，它们难以设计与检测，而且还容易受到掩模形貌效应的影响。光瞳滤波器改变了投影物镜光瞳的透过率和相位，可以在提高分辨率和增大焦深之间取得适当的平衡。可变光瞳滤波器可用于精调光刻成像性能。

光源掩模优化技术采用先进的优化技术来确定最佳光源形状和掩模版图组合。该技术将单次曝光光刻技术推向其物理极限。多重曝光技术将掩模版图分解为多个子版图，采用优化后的照明、偏振等条件对各个子版图进行成像。

参 考 文 献

- [1] H. Jasper, T. Modderman, M. van de Kerkhof, C. Wagner, J. Mulkens, W. de Boeijj, E. van Setten, and B. Kneer, “Immersion lithography with an ultrahigh-NA in-line catadioptric lens and a high-transmission flexible polarization illumination system,” *Proc. SPIE* **6154**, 61541W, 2006.
- [2] Y. Chen, L. Sun, Z. J. Qi, S. Zhao, F. Goodwin, I. Matthew, and V. Plachecki, “Tip-to-tip variation mitigation in extreme ultraviolet lithography for 7 nm and beyond metallization layers and design rule analysis,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **35**(6), 06G601, 2017.
- [3] M. Burkhardt, A. Yen, C. Progler, and G. Wells, “Illuminator design for printing of regular contact patterns,” *Microelectron. Eng.* **41/42**, 91, 1998.
- [4] T.-S. Gau, R.-G. Liu, C.-K. Chen, C.-M. Lai, F.-J. Liang, and C. C. Hsia, “Customized illumination aperture filter for low k_1 photolithography process,” *Proc. SPIE* **4000**, 271–282, 2000.
- [5] J. Finders, S. Wuister, T. Last, G. Rispens, E. Psari, J. Lubkoll, E. van Setten, and F. Wittebrood, “Contrast optimization for 0.33 NA EUV lithography,” *Proc. SPIE* **9776**, 97761P, 2016.
- [6] M. Ismail, P. Evanschitzky, A. Erdmann, G. Bottiglieri, E. van Setten, and T. F. Fliervoet, “Simulation study of illumination effects in high-NA EUV lithography,” *Proc. SPIE* **10694**, 106940H, 2018.
- [7] J. Zimmermann, P. Gräupner, J. T. Neumann, D. Hellweg, D. Jürgens, M. Patra, C. Hennerkes, M. Maul, B. Geh, A. Engelen, O. Noordman, M. Mulder, S. Park, and J. D. Vocht, “Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners,” *Proc. SPIE* **7640**, 764005, 2010.

- [8] R. Wu, Z. Zheng, H. Li, and X. Liu, “Freeform lens for off-axis illumination in optical lithography system,” *Opt. Commun.* **284**, 2662–2667, 2011.
- [9] L. W. Liebmann, K. Vaidyanathan, and L. Pileggi, *Design Technology Co-Optimization in the Era of Sub-Resolution IC Scaling*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2016.
- [10] D. G. Smith, N. Kita, N. Kanayamaya, R. Matsui, S. R. Palmera, T. Matsuyama, and D. G. Flagello, “Illuminator predictor for effective SMO solutions,” *Proc. SPIE* **7973**, 797309, 2011.
- [11] M. M. Crouse, E. Schmitt-Weaver, S. G. Hansen, and R. Routh, “Experimental demonstration of dark field illumination using contact hole features,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **25**, 2453–2460, 2007.
- [12] J. F. Chen, T. Laidig, K. E. Wampler, and R. Caldwell, “Optical proximity correction for intermediate-pitch features using sub-resolution scattering bars,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **15**, 2426, 1997.
- [13] S. M. Mansfield, L. W. Liebmann, A. F. Molles, and A. K.-K. Wong, “Lithographic comparison of assist feature design strategies,” *Proc. SPIE* **4000**, 63, 2000.
- [14] B. W. Smith, “Mutual optimization of resolution enhancement techniques,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **1**(2), 95, 2002.
- [15] M. Rothschild, “Projection optical lithography,” *Materials Today* **8**, 18–24, 2005.
- [16] M. L. Rieger and J. P. Stirnimann, “Using behavior modeling for proximity correction,” *Proc. SPIE* **2197**, 371, 1994.
- [17] N. B. Cobb, *Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing*. PhD thesis, University of California at Berkeley, 1998.
- [18] N. B. Cobb, A. Zakhor, and E. A. Miloslavsky, “Mathematical and CAD framework for proximity correction,” *Proc. SPIE* **2726**, 208, 1996.
- [19] R. J. Socha, D. J. V. D. Broeke, S. D. Hsu, J. F. Chen, T. L. Laidig, N. Corcoran, U. Hollerbach, K. E. Wampler, X. Shi, and W. Conley, “Contact hole reticle optimization by using interference mapping lithography (IML),” *Proc. SPIE* **5377**, 222, 2004.
- [20] A. Lutich, “Alternative to ILT method for high-quality full-chip SRAF insertion,” *Proc. SPIE* **9426**, 94260U, 2015.
- [21] S. Wang, S. Baron, N. Kachwala, C. Kallingal, D. Sun, V. Shu, W. Fong, Z. Li, A. Elsaied, J.-W. Gao, J. Su, J.-H. Ser, Q. Zhang, B.-D. Chen, R. Howell, S. Hsu, L. Luo, Y. Zou, G. Zhang, Y.-W. Lu, and Y. Cao, “Efficient full-chip SRAF placement using machine learning for best accuracy and improved consistency,” *Proc. SPIE* **10587**, 105870N, 2018.
- [22] Y. Liu and A. Zakhor, “Binary and phase-shifting image design for optical lithography,” *Proc. SPIE* **1463**, 382, 1991.

- [23] A. Poonawala and P. Milanfar, “Mask design for optical microlithography: An inverse imaging problem,” *IEEE Trans. Image Process.* **16**, 774, 2007.
- [24] B. E. A. Saleh and S. I. Sayegh, “Reduction of errors of microphotographic reproductions by optimal corrections of original masks,” *Opt. Eng.* **20**(5), 781, 1981.
- [25] Y. C. Pati and T. Kailath, “Phase-shifting masks for microlithography: Automated design and mask requirements,” *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 2438, 1994.
- [26] Y.-H. Oh, J.-C. Lee, K.-C. Park, C.-S. Go, and S. Lim, “Optical proximity correction of critical layers in DRAM process of 0.12- μm minimum feature size,” *Proc. SPIE* **4346**, 1567, 2001.
- [27] Y. Granik, “Fast pixel-based mask optimization for inverse lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **5**(4), 43002, 2006.
- [28] A. Poonawala, *Mask Design for Single and Double Exposure Optical Microlithography: An Inverse Imaging Approach*. PhD thesis, University of California Santa Cruz, 2007.
- [29] S. Wang, J. Su, Q. Zhang, W. Fong, D. Sun, S. Baron, C. Zhang, C. Lin, B.-D. Chen, R. C. Howell, S. D. Hsu, L. Luo, Y. Zou, Y.-W. Lu, and Y. Cao, “Machine learning assisted SRAF placement for full chip,” *Proc. SPIE* **10451**, 104510D, 2017.
- [30] X. Su, P. Gao, Y. Wei, and W. Shi, “SRAF rule extraction and insertion based on inverse lithography technology,” *Proc. SPIE* **10961**, 109610P, 2019.
- [31] P. De Bisschop, “Optical proximity correction: A cross road of data flows,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**(6S1), 06GA01, 2016.
- [32] P. De Bisschop, “How to make lithography patterns print: The role of OPC and pattern layout,” *Adv. Opt. Technol.* **4**, 253–284, 2015.
- [33] A. Erdmann and R. Gordon, Mask Topography Effects in Reticle Enhancement Technologies, Short Course at SPIE Microlithography, 2003.
- [34] T. Terasawa, N. Hasegawa, A. Imai, T. P. Tanaka, and S. Katagiri, “Variable phase-shift mask for deep-submicron optical lithography,” *Proc. SPIE* **1463**, 197, 1991.
- [35] B. Tyrrell, M. Fritze, D. Astolfi, R. Mallen, B. Wheeler, P. Rhyins, and P. Martin, “Investigation of the physical and practical limits of dense-only phase shift lithography for circuit feature definition,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **1**(3), 243–252, 2002.
- [36] M. L. Rieger, J. P. Mayhew, and S. Panchapakesan, “Layout design methodologies for sub-wavelength manufacturing,” in *Proc. 38th Design Automation Conference* **85**, IEEE, 2001.
- [37] Z. M. Ma and A. Andersson, “Preventing sidelobe printing in applying attenuated phase-shift reticles,” in *Proc. SPIE* **3334**, 543–552, 1998.
- [38] H. J. Lee, M.-Y. Lee, and J.-H. Lee, “Suppression of sidelobe and

- overlap error in AttPSM metal layer lithography using rule-based OPC,” *Proc. SPIE* **5377**, 1112–1120, 2004.
- [39] H. Iwasaki, K. Hoshi, H. Tanabe, and K. Kasama, “Attenuated phase-shift masks reducing side-lobe effect in DRAM peripheral circuit region,” *Proc. SPIE* **3236**, 544–550, 1997.
- [40] T. S. Wu, E. Yang, T. H. Yang, K. C. Chen, and C. Y. Lu, “Novel lithography rule check for full-chip side lobe detection,” *Proc. SPIE* **6924**, 1032, 2008.
- [41] W. Henke and U. Glaubitz, “Increasing resolution and depth of focus in optical microlithography through spatial filtering techniques,” *Microelectron. Eng.* **17**, 93–97, 1992.
- [42] H. Fukuda, Y. Kobayashi, K. Hama, T. Tawa, and S. Okazaki, “Evaluation of pupil-filtering in high-numerical aperture i-line lens,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 5845, 1993.
- [43] R. M. von Bünau, G. Owen, and R. F. Pease, “Optimization of pupil filters for increased depth of focus,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 5850–5855, 1993.
- [44] B. W. Smith and H. Kang, “Spatial frequency filtering in the pellicle plane,” *Proc. SPIE* **4000**, 252, 2000.
- [45] F. Staals, A. Andryzhyieuskaya, H. Bakker, M. Beems, J. Finders, T. Hollink, J. Mulkens, A. Nachtwein, R. Willekers, P. Engblom, T. Gruner, and Y. Zhang, “Advanced wavefront engineering for improved imaging and overlay applications on a 1.35 NA immersion scanner,” *Proc. SPIE* **7973**, 79731G, 2011.
- [46] Y. Ohmura, Y. Tsuge, T. Hirayama, H. Ikezawa, D. Inoue, Y. Kitamura, Y. Koizumi, K. Hasegawa, S. Ishiyama, T. Nakashima, T. Kikuchi, M. Onda, Y. Takase, A. Nagahiro, S. Isago, and H. Kawahara, “High-order aberration control during exposure for leading-edge lithography projection optics,” *Proc. SPIE* **9780**, 98–105, 2016.
- [47] J. Finders, M. Dusa, P. Nikolsky, Y. van Dommelen, R. Watso, 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.
- [48] V. Singh, B. Hu, K. Toh, S. Bollepalli, S. Wagner, and Y. Borodovsky, “Making a trillion pixels dance,” *Proc. SPIE* **6924**, 69240S, 2008.
- [49] 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.
- [50] T. Fühner, *Artificial Evolution for the Optimization of Lithographic Process Conditions*. PhD thesis, Friederich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [51] A. Poonawala and P. Milanfar, “A pixel-based regularization approach to inverse lithography,” *Microelectron. Eng.* **84**, 2837–2852, 2007.

- [52] X. Ma and G. R. Arce, “Pixel-based simultaneous source and mask optimization for resolution enhancement in optical lithography,” *Opt. Express* **17**, 5783–5793, 2009.
- [53] X. Ma and Y. Li, “Resolution enhancement optimization methods in optical lithography with improved manufacturability,” *J. Micro/Nano-lithogr. MEMS MOEMS* **10**(2), 23009, 2011.
- [54] X. Ma, L. Dong, C. Han, J. Gao, Y. Li, and G. R. Arce, “Gradient-based joint source polarization mask optimization for optical lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **14**(2), 23504, 2015.
- [55] F. Santosa, “A level set approach for inverse problems involving obstacles,” *ESAIM Control Optim. Calc. Var* **1**, 17–33, 1996.
- [56] L. Pang, Y. Liu, and D. Abrams, “Inverse lithography technology (ILT): A natural solution for model-based SRAF at 45-nm and 32-nm,” *Proc. SPIE* **6607**, 660739, 2007.
- [57] Y. Shen, N. Jia, N. Wong, and E. Y. Lam, “Robust level-set-based inverse lithography,” *Opt. Express* **19**, 5511, 2011.
- [58] W. Lv, S. Liu, Q. Xia, X. Wu, Y. Shen, and E. Y. Lam, “Level-set-based inverse lithography for mask synthesis using the conjugate gradient and an optimal time step,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **31**, 041605, 2013.
- [59] A. E. Rosenbluth, S. Bukovsky, C. Fonseca, M. Hibbs, K. Lai, A. F. Molless, R. N. Singh, and A. K.-K. Wong, “Optimum mask and source patterns to print a given shape,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **1**(1), 13, 2002.
- [60] R. J. Socha, X. Shi, and D. LeHoty, “Simultaneous source mask optimization (SMO),” *Proc. SPIE* **5853**, 180, 2005.
- [61] P. S. Davids and S. B. Bollepalli, “Generalized inverse problem for partially coherent projection lithography,” *Proc. SPIE* **6924**, 69240X, 2008.
- [62] T. Fühner, A. Erdmann, and S. Seifert, “A direct optimization approach for lithographic process conditions,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **6**(3), 31006, 2007.
- [63] J. He, L. Dong, L. Zhao, Y. Wei, and T. Ye, “Retargeting of forbidden-dense-alternate structures for lithography capability improvement in advanced nodes,” *Appl. Opt.* **57**(27), 7811–7817, 2018.
- [64] P. Liu, “Mask synthesis using machine learning software and hardware platforms,” *Proc. SPIE* **11327**, 30–45, 2020.
- [65] W. Ye, M. B. Alawieh, Y. Watanabe, S. Nojima, Y. Lin, and D. Z. Pan, “TEMPO: Fast mask topography effect modeling with deep learning,” *Proceedings of the 2020 International Symposium on Physical Design, ISPD ‘20*, 127–134, Association for Computing Machinery, New York, 2020.
- [66] S. D. Hsu and J. Liu, “Challenges of anamorphic high-NA lithography and mask making,” *Adv. Opt. Technol.* **6**, 293–310, 2017.

- [67] Y. Granik, “Solving inverse problems of optical microlithography,” *Proc. SPIE 5754*, 506, 2005.
- [68] K. Lai, “Review of computational lithography modeling: Focusing on extending optical lithography and design-technology co-optimization,” *Adv. Opt. Technol. 1*, 249–267, 2012.
- [69] M. Hasegawa, A. Suzuki, K. Saitoh, and M. Yoshii, “New approach for realizing $k_1=0.3$ optical lithography,” *Proc. SPIE 3748*, 278, 1999.
- [70] S. Hsu, J. Park, D. V. D. Broeke, and J. F. Chen, “Double exposure technique for 45nm node and beyond,” *Proc. SPIE 5992*, 59921Q, 2005.
- [71] J. Bekaert, L. V. Look, V. Truffert, F. Lazzarino, G. Vandenberghe, M. Reybrouck, and S. Tarutani, “Comparing positive and negative tone development process for printing the metal and contact layers of the 32- and 22-nm nodes,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS 9(4)*, 43007, 2010.
- [72] H. Fukuda, N. Hasegawa, and S. Okazaki, “Improvement of defocus tolerance in a half-micron optical lithography by the focus latitude enhancement exposure method: Simulation and experiment,” *J. Vac. Sci. Technol. B 7*, 667, 1989.
- [73] I. Lalovic, J. Lee, N. Seong, N. Farrar, M. Kupers, H. van der Laan, T. van der Hoeff, and C. Kohler, “Focus drilling for increased process latitude in high-NA immersion lithography,” *Proc. SPIE 7973*, 797328, 2011.

第 5 章

材料驱动的分辨率增强技术

第 4 章介绍了几种通过改变掩模和照明等光学成像系统组件增强分辨率的方法。这些光学分辨率增强技术的目的是提升空间像或光强分布的质量。这些衍射受限空间像对光刻胶进行曝光，对光刻胶或其他材料产生空间调制，图形转移至光刻胶。本章将介绍适用于图形转移的几种重要的新型分辨率增强技术。这些新技术需要利用材料的特殊（非线性）属性，并需要将不同材料与工艺组合起来使用，因此称它们为材料驱动的分辨率增强技术。

本章首先回顾影响分辨率的光学因素，然后介绍利用多重成像或多重复工步骤实现微细图形加工的图形化策略。接下来介绍几种特殊的双重曝光和双重图形技术，利用这些技术采用 193nm 浸没式光刻也可以制造特征尺寸小于 45nm 的图形。导向自组装是一种低成本图形微缩技术。最后一节简要介绍薄膜成像技术，该技术利用几种材料和工艺共同实现光刻胶的功能。

5.1 分辨率极限回顾

2.3.1 节中，在线性光学材料的假设条件下推导得到了分辨率极限公式。线性材料的光学性质与入射光的光强无关。实际上，光导致的消光系数和 / 或折射率变化等非线性光学效应将会影响阿贝 - 瑞利准则的有效性，产生其无法描述的效应。有些材料在曝光区域折射率会变大。这类材料对光的作用与聚焦透镜类似，可以形成小于经典光学分辨率极限的光斑。类似的光学非线性性质能够补偿光学衍射效应，使光强分布可以在不改变形状的同时传输得更远。空间孤子的焦深明显不服从瑞利准则。

通常光强较大时才会触发非线性光学效应，因此非线性光学效应一般不会发生在光学投影光刻中。但由于入射光会导致光刻胶发生光化学反应，如果这些化学反应能够改变光刻胶的光学性质，那么光学投影光刻中也可能存在非线性光学效应。DNQ 型光刻胶被波长为 300 ~ 500nm 的光辐照后，消光系数会发生变化，透光率

变得更高，即 DNQ 型光刻胶会发生漂白。依照 Kramer-Kroning 关系^[1]，DNQ 型光刻胶的折射率也可能发生变化。实验测量数据表明其折射率变化可达到 $\Delta n=0.04$ ^[2]。对于几微米厚的 DNQ 型光刻胶，这种光学非线性效应会明显影响工艺窗口和光刻胶形貌^[3]。最先进的化学放大光刻胶不存在这种漂白效应和光致折射率变化现象。上述非线性效应还可应用于不受衍射限制的激光直写光学光刻^[4]和受激发射损耗 (STED) 光刻^[5, 6]等纳米图形化技术中（参见 7.3.2 节和 7.4.3 节）。

2.3.1 节得到的另一个重要结论是：孤立线条的成像理论上没有分辨率极限。理论上的分辨率极限 $0.25\lambda/NA$ 仅适用于密集图形。图 5.1 展示了不同工艺因子 k_1 条件下密集和半密集线的空间像截面图，线宽 $w=k_1\lambda/NA$ 。密集线和半密集线的周期分别为 $p=2w$ 和 $p=4w$ 。图 5.1 中的 CD 数据为依照式 (2.20) 得到的最小特征尺寸。

当工艺因子 k_1 降低时，密集线和半密集线的对比度都降低。 $k_1 \leq 0.25$ 时所有密集线条的像强度分布为常数。而 $k_1 \leq 0.25$ 时半密集线仍然存在非常数光强分布。举例来看，如果用 0.33 作为光强阈值，可以在半密集线中获得 30nm 的图形，而此时 $k_1=0.21$ 。

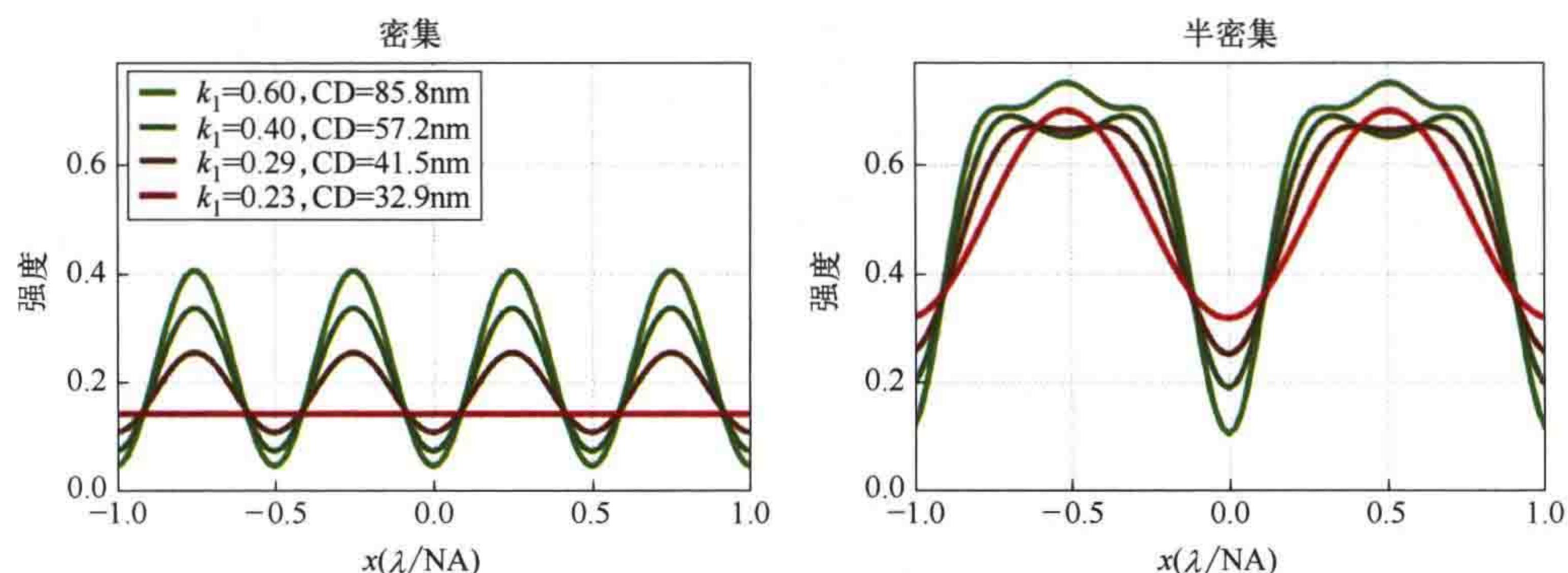


图 5.1 不同工艺因子 k_1 情况下衰减型相移掩模密集线（左）与半密集线（右）的空间像截面图。

光学设置： $\lambda=193\text{nm}$, $NA=1.35$, 环形照明 $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.8/0.98$

图 5.2 展示了利用半密集线图形产生密集图形的方法。可以分两步得到密集线图形。首先，制备一个周期为目标图形周期的 2 倍的半密集图形。然后平移，制备另一个相同的半密集图形。两个半密集图形组合起来形成密集图形。

如何利用两次曝光或两次光刻产生小于分辨率极限的密集线呢？图 5.3 展示了每次曝光后光刻胶内发生的现象。两次曝光在光刻胶内产生了足够的光强与光敏组分 (PAG) 调制。利用式 (3.9) 可推导出曝光光强分别为 I_1 和 I_2 、曝光时间为 t_{exp} 的两次曝光得到的光酸生成剂浓度 [PAG]：

$$[\text{PAG}] = \exp(-I_1 t_{exp} C_{\text{Dill}}) \exp(-I_2 t_{exp} C_{\text{Dill}}) = \exp[-(I_1 + I_2)t_{exp} C_{\text{Dill}}] \quad (5.1)$$

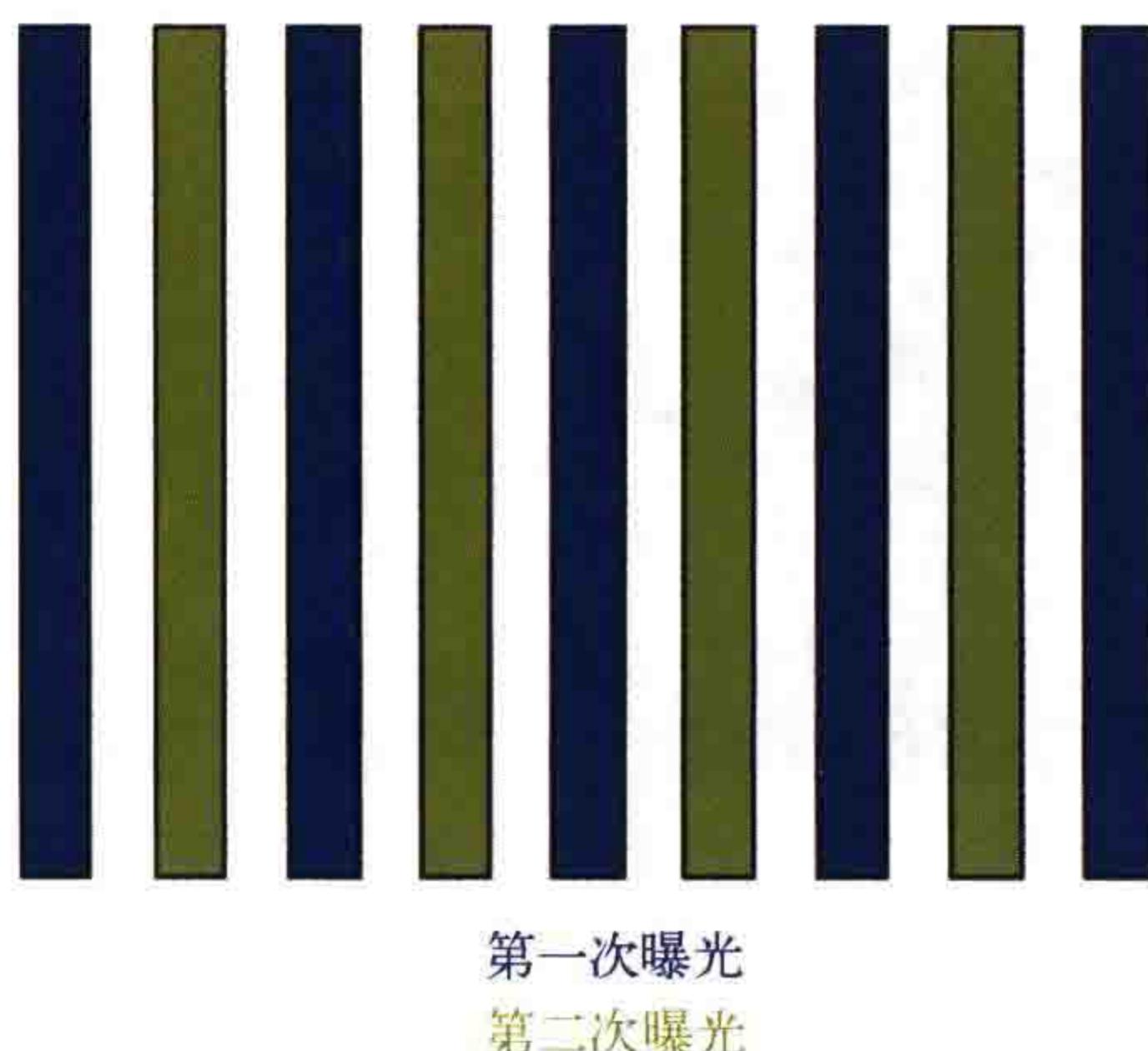


图 5.2 双重图形技术的原理示意图

该式表明两次曝光的光强分布发生了线性叠加。总的 PAG 分布如图 5.3 右图所示。受光刻胶材料消光系数的影响，PAG 分布仅仅在光刻胶深度 z 方向上存在变化，在 x 方向是常数。也就是说，顺序交错曝光周期接近分辨率极限的线空图形，将使光刻胶被均匀曝光。光刻工艺完成之后不会对化学组分产生任何空间调制或形成任何几何形状。

这一观察结果可以理解为：两次曝光都接近系统的分辨率极限。每次曝光

仅有两个衍射级次参与成像，沿 x 方向形成 \cos^2 形光强分布。第二次曝光时移动掩模，将 $\cos^2 x$ 变为 $\sin^2 x$ 。两次曝光强度的叠加为 $\cos^2 x + \sin^2 x$ ，是常数。

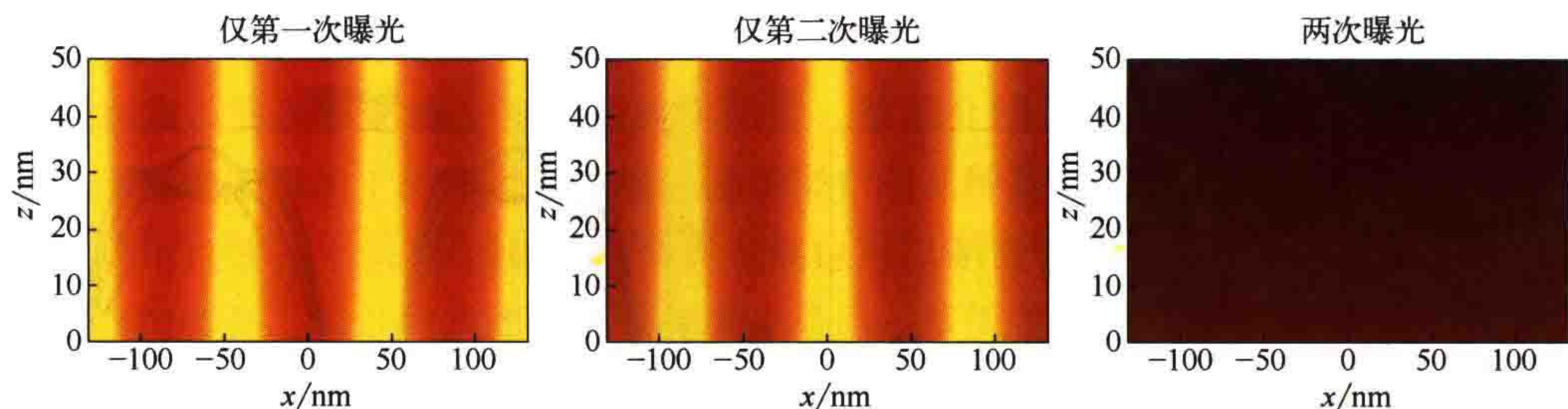


图 5.3 双重曝光技术的光酸生成剂浓度仿真结果。两次曝光之间采用线性叠加。左：线宽为 22nm、周期为 88nm 线图形的第一曝光。中：掩模沿 x 轴平移 44nm 后的第二曝光。右：两次曝光的叠加。

图中颜色越亮代表 PAG 浓度越高。成像条件： $\lambda=193\text{nm}$, $\text{NA}=1.35$, 偏振二极照明，光刻胶厚度为 50nm，采用了折射率匹配的基底

为了将两次曝光中的光强调制转换为对光刻胶的空间调制并形成图形，需要将两次曝光进行非线性叠加。有两种不同的非线性叠加方案，即双重曝光技术和双重图形技术。双重曝光技术利用了光刻胶光敏组分的非线性调制特性，需要用到具有非线性光学性质的光刻胶或其他膜层材料。在双重曝光技术的两次曝光之间不需要对光刻胶做特殊处理，不需要将硅片移至光刻机之外。因此，双重曝光技术的产率高，且成本低于双重图形技术。

双重图形技术在光刻胶工艺中引入化学非线性过程。在第二次曝光之前，第一次曝光中的调制光强被转换成光刻胶或其下延层的化学调制或几何调制。双重图形技术需要在两次曝光之间对光刻胶或者硅片膜层进行特殊处理。为完成上述操作，需要将硅片移出光刻机，会降低产率，增加工艺成本。在下面的章节中会列举几种双重曝光和双重图形技术。

5.2 非线性双重曝光

4.6节介绍了几种线性多重曝光技术，这些技术通过将叠加单次曝光成像结果提升成像质量。 $k_1 < 0.25$ 时，利用线性多重曝光技术不能实现密集线空图形的成像。采用光学非线性材料的双重曝光技术可以实现亚分辨率($k_1=0.25$)密集线空图形成像^[7]。本节简要介绍这些技术的基本原理和不足。

5.2.1 双光子吸收材料

双光子吸收(TPA)材料是光学非线性材料的首选。该材料的光敏组分浓度与入射光强呈二次关系：

$$[\text{PAG}] = \exp(-I_1^2 t_{\text{exp}} C_{\text{Dill}}) \exp(-I_2^2 t_{\text{exp}} C_{\text{Dill}}) = \exp[-(I_1^2 + I_2^2)t_{\text{exp}} C_{\text{Dill}}] \quad (5.2)$$

该式的二次项使得入射光对光酸生成剂(PAG)产生空间上更加局域的影响。图 5.4 为采用双光子吸收材料对线空图形进行双重曝光的仿真结果。相比于图 5.3 所示的线性或单光子吸收材料，平方后的光强叠加后在 x 方向上形成了低(化学)对比度像，该像可以被转移到光刻胶中。

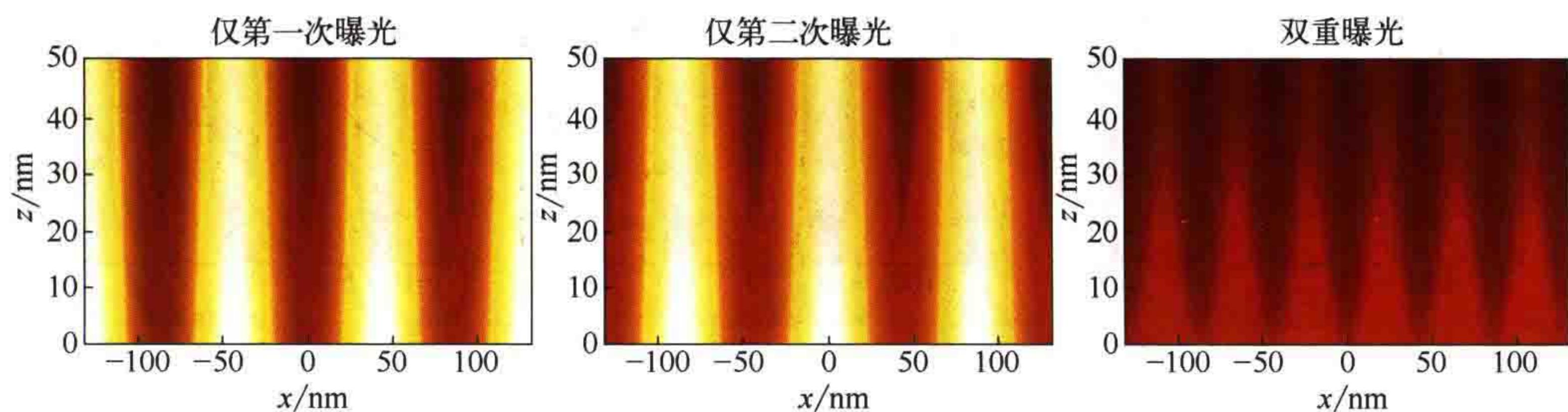


图 5.4 双重曝光的光酸生成剂浓度仿真结果。两次曝光结果按照二次关系叠加。
所有参数与图 5.3 相同

材料问题是将双光子吸收应用于光学投影光刻时面临的最大挑战。现存材料的非线性太弱，不能满足量产工艺的需求。目前，多光子光刻的最佳候选材料为由可见光激发的标准紫外光刻材料，以及聚甲基丙烯酸甲酯等由多光子吸收激发的宽带隙材料^[8]。3D 多光子光刻(见 7.4.3 节)采用了对 520nm 和 730nm 波长敏感的二正丁氨基联苯(DABP) - 三丙烯酸酯树脂材料。实验中使用的聚焦激光束的曝光剂量约为 104W/cm^2 ^[9]，比光学投影光刻中的典型剂量大 6 个数量级。关于双光子吸收光刻胶灵敏度的研究中也报道了类似的数据^[10]。Jeff Byers 等人^[7, 11]估计，需要 4×10^{13} 个激光脉冲才能对 PAG 进行充分的非线性调制(典型光刻曝光中仅需要数百个脉冲)。中间态双光子(ISTP)材料^[7]可以减轻对剂量的要求。但目前还没有找到适合于半导体光刻的 ISTP 材料。关于 TPA 光刻的其他内容请见 7.3.2 节、7.4.3 节以及参考文献 [7, 12]。

5.2.2 光阈值材料

光阈值材料是另一种可实现光刻胶光敏组分非线性调制的材料。在理想阈值材料中，曝光剂量需要达到一定的阈值 D_{THR} 才能改变光敏组分或 PAG。剂量小于此阈值时不会发生光化学反应。达到阈值剂量时，会发生明显的光化学阈值响应。曝光剂量超过阈值剂量时，超出的部分也不会对这种反应产生任何影响^[7]。上述行为可以描述为：

$$[\text{PAG}] = \begin{cases} [\text{PAG}]_0, & It_{\text{exp}} < D_{\text{THR}} \\ [\text{PAG}]_1, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.3)$$

式中， $[\text{PAG}]_0$ 是光酸生成剂的初始浓度，为常数； $[\text{PAG}]_1$ 是曝光剂量 It_{exp} 超过阈值剂量 D_{THR} 的位置的 PAG 浓度。图 5.5 为对线空图形进行单次曝光以及两次曝光叠加后的 PAG 浓度分布。可见单次曝光和双重曝光都产生了非常好的化学对比度。

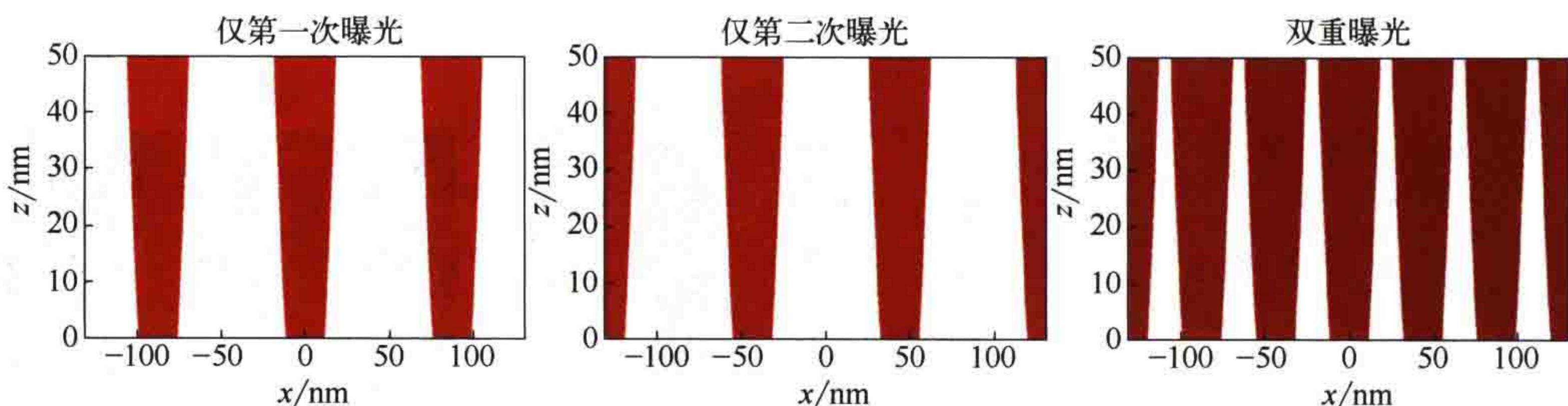


图 5.5 采用光阈值材料的双重曝光的光酸浓度仿真结果。所有参数与图 5.3 中相同

遗憾的是式 (5.3) 所描述的阈值行为是非常理想化的。截至目前，能够表现出这种阈值行为的光学现象非常稀少。这种阈值行为的一个例子是：采用碳悬浮液和反向饱和吸收器可减小短脉冲激光的光强，从而保护眼睛和光电传感器^[13]。仅在红光或远红外光波段发现过相关现象，在紫外光谱范围内尚未发现过。

5.2.3 可逆对比度增强材料

双光子吸收材料和阈值材料利用了光刻胶的光学非线性性质。对比度增强材料沉积在光刻胶上面。在入射光的作用下，对比度增强层 (CEL) 会漂白。这些材料在被光照射的成像区域透光率会变高，所以可增大光刻胶内像的对比度。用 D_{resist} 表示在 CEL 底部 / 光刻胶顶部的曝光剂量。假设入射光垂直入射且不考虑光穿过 CEL 发生的近场衍射， D_{resist} 与入射光剂量 D_{inc} 之间的关系可以用如下简化模型描述^[14]：

$$D_{\text{resist}} = D_{\text{inc}} \exp[-A_{\text{Dill}}(1 - C_{\text{Dill}} D_{\text{Dill}})d_{\text{CEL}}] \quad (5.4)$$

式中, A_{Dill} , C_{Dill} 和 d_{CEL} 分别代表漂白吸收系数、光敏感度和 CEL 厚度。图 5.6 展示不同漂白吸收系数 A_{Dill} 下, 计算出的光刻胶顶部归一化曝光剂量 D_{resist} 。双光束干涉使得 CEL 顶部的曝光剂量分布为 $D_{\text{inc}} = \sin^2\left(\frac{2\pi x}{p}\right)$ 。左图和中图中的曝光剂量分布相差半个周期。右侧的剂量分布图是左图和中图的叠加, 表示对密集线空图形双重曝光的结果。所有 D_{resist} 曲线都以光刻胶内最大曝光剂量进行了归一化。 $A_{\text{Dill}}=0$ 的曲线表示分布为 \sin^2 和 \cos^2 函数的曝光剂量的线性叠加, 二者在光刻胶中叠加形成常数曝光剂量。 A_{Dill} 不等于零时引入了非线性, 使得第一次和第二次曝光的曝光剂量峰变窄, 从而形成叠加后的图形。叠加后曝光剂量分布的对比度随着 A_{Dill} 的增大而增大。

图 5.6 的结果表明 CEL 的光学非线性可为实现 $k_1 < 0.25$ 光刻成像提供一种潜在的技术手段。由于需要在第一次和第二次曝光之间更新 CEL, 所以采用了可逆对比度增强层 (RCEL) 这一术语。

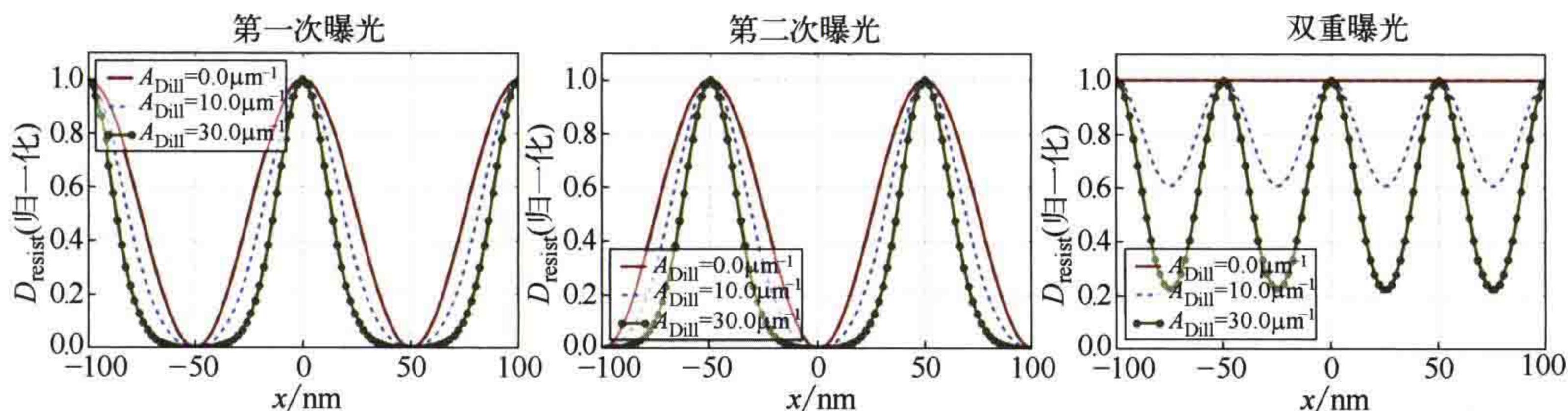


图 5.6 按照式 (5.4) 计算出的光刻胶顶部归一化剂量分布 D_{resist} 。图中的曲线为对应不同 CEL 参数和不同曝光剂量 D_{inc} 的 \sin^2 分布。光敏感度 $C_{\text{Dill}}=1.0 \text{ cm}^2/\text{mJ}$, CEL 的厚度 $d_{\text{CEL}}=100 \text{ nm}$, 周期 $p=100 \text{ nm}$ 。转载自参考文献 [15]

式 (5.4) 所示的模型忽略了 RCEL 对光的衍射。因此无法利用该模型对亚微米光刻进行定量分析。对 RCEL 曝光进行严格仿真, 结果如图 5.7 所示。由于 RCEL 的光学非线性, 叠加后的光强和 PAG 浓度表现出了明显的空间调制, 特别是在靠近光刻胶表面的区域。但这种清晰的光强 /PAG 浓度调制仅发生在光刻胶表面以下 $10 \sim 20 \text{ nm}$ 范围内, 而且这里假设 RCEL 的非线性参数都非常大。现实中很难找到这种材料。

对亚微米光刻中的 RCEL 材料进行定量分析, 可以加深对图 5.7 所示光学现象的理解, 请见 Shao 等人发表的论文^[15]。RCEL 的光学非线性性质可对其中的光产生高空间频率的光学调制。但这些较高的空间频率成分不能在光刻胶中传播, 而是会在光刻胶顶部形成倏逝波, 即从光刻胶表面开始随着传播深度的增加按照指数规

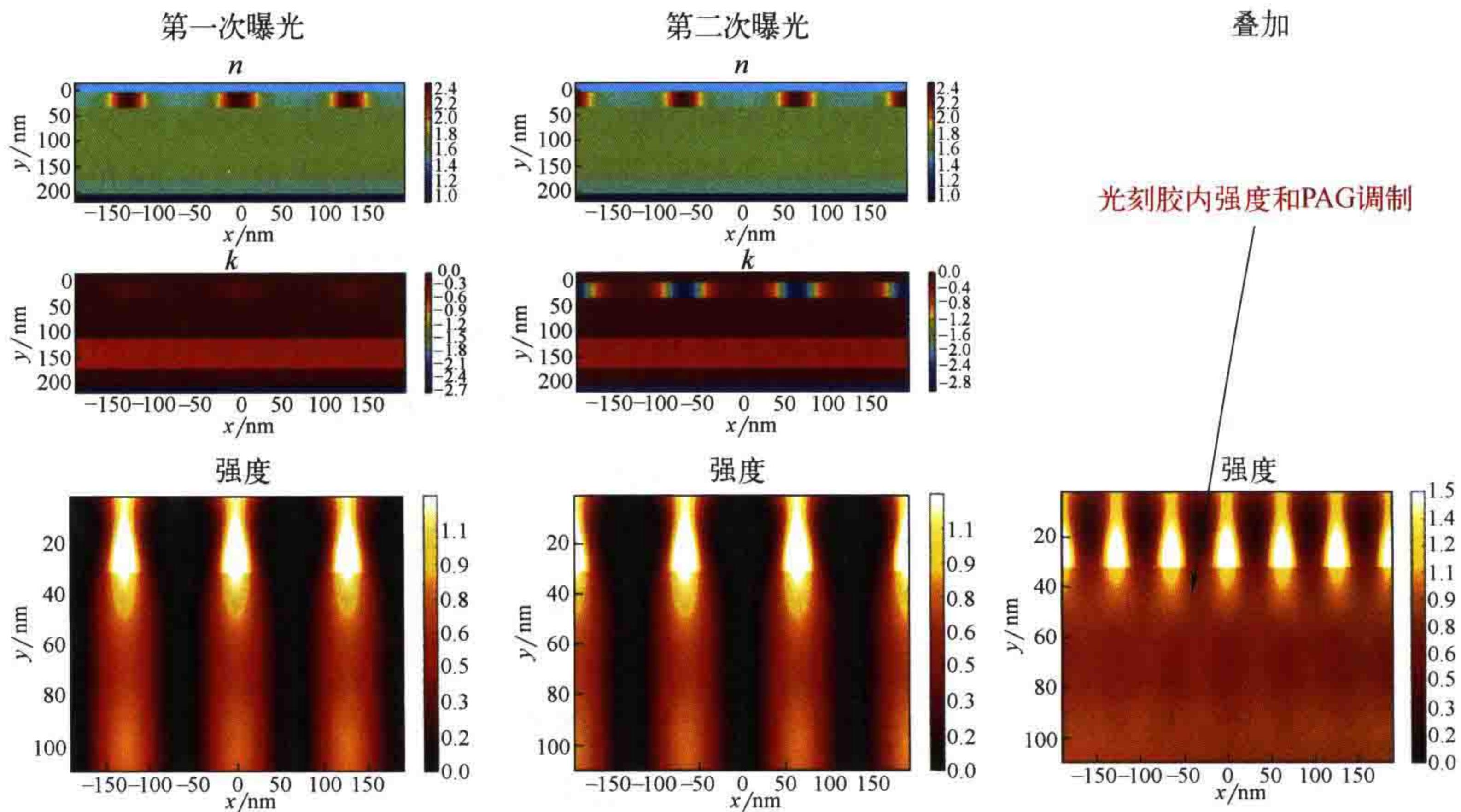


图 5.7 基于 RCEL 的双重曝光严格仿真结果。图中所示为严格仿真得到的强度分布以及每次曝光结束后光刻胶膜层光学材料的性质变化。右侧为两次曝光强度分布的叠加。转载自参考文献 [16]

律衰减。倏逝波的耦合效率和穿透深度，与 RCEL 上干涉波的入射角以及 RCEL/光刻胶的折射率密切相关。当入射角较小或者 NA 较小、RCEL 与光刻胶的折射率较大时，可提高光的耦合效率，增大倏逝波的穿透深度。基于 RCEL 的双重曝光可以提升 $NA=0.6$ 时光刻胶内的光强对比度。目前还没有材料可以实现 $k_1=0.125$ 、 $NA > 0.8$ 条件下的双重曝光。虽然将高频光耦合进光刻胶比较困难，但是采用 RCEL 仍然可以提升小 k_1 条件下的光刻性能。RCEL 分辨率增强技术可以提升关键工艺的曝光剂量裕度。

5.3 双重与多重图形技术

双重图形技术是将 193nm 浸没式光刻延伸至关键尺寸 $\leq 45\text{nm}$ 的芯片制造关键技术。与非线性双重曝光技术不同，双重图形技术不存在材料与产率方面的问题，已广泛应用于先进半导体制造。双重图形技术采用不同的工艺技术，通过单次或两次独立曝光实现图形转移。该技术还可以很方便地推广到三重与四重图形技术，但是会增加成本。本节的最后将对三重与四重图形技术作一些讨论，其余部分均重点讨论双重图形技术。

5.3.1 光刻 – 刻蚀 – 光刻 – 刻蚀

通过顺次进行两次相互独立的光刻与刻蚀，可将密集线空图形转移到基底材料

上，这是最直接的方法^[17, 18]。图 5.8 展示了光刻 - 刻蚀 - 光刻 - 刻蚀 (LELE) 的工艺流程。该工艺目的就是在多晶硅片的氧化硅层上形成密集的线空图形。

使用硬掩模可方便地将图形转移至下层。硬掩模与基底材料之间的刻蚀选择性通常会明显优于光刻胶与基底材料之间的刻蚀选择性。通过化学气相沉积 (CVD)，可沉积 SiN、SiON 和 TiN 等无机硬掩模材料。旋涂碳 (SOC) 等有机硬掩模材料是一种含碳量很高的聚合物，可以作为备选材料，提升平坦化能力^[19]。硬掩模不仅可用于 LELE 中，也常用于许多先进半导体制造工艺中。

如图 5.8 所示，LELE 工艺首先执行旋转涂胶和标准光刻工艺。光刻工艺在光刻胶中产生半密集图形，然后通过刻蚀将光刻胶图形转移到硬掩模上。接下来将光刻胶剥离，进行第二次图形工艺。第二次图形化工艺也从旋转涂胶开始。第二次光刻采用的掩模图形为位置发生偏移后的掩模图形，在刚刚形成了图形的硬掩模上（光刻胶中）形成半密集图形。该图形与第一次光刻产生的半密集图形会错开一定的位置，将硬掩模上图形的密度翻倍。剥离光刻胶，将硬掩模上的图形转移到下层的氧化物层中，完成整套工艺。

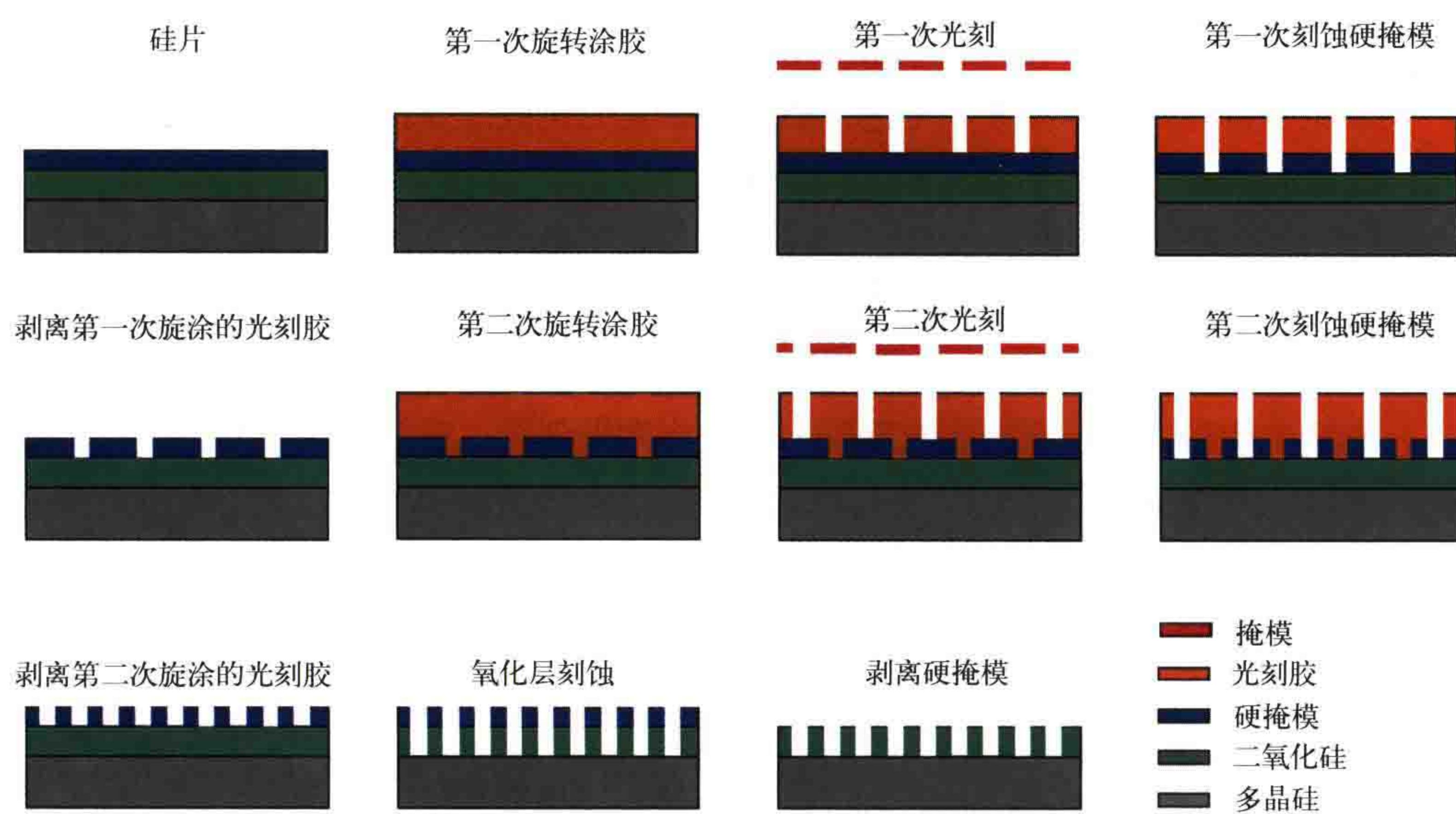


图 5.8 光刻 - 刻蚀 - 光刻 - 刻蚀 (LELE) 工艺步骤

LELE 可以利用现有的材料实施，可以适用于更复杂的图形。参考文献 [20] 报道了按照双重或多重复合图形技术的需求拆分目标设计图形的方法。参考文献 [21] 讨论了 LELE 工艺在套刻控制以及光刻胶与硅片膜层材料的刻蚀选择性等方面典型的工艺需求。

5.3.2 光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀

光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀 (LFLE) 工艺, 有时也被称为光刻 - 硬化 - 光刻 - 刻蚀 (LCLE) 或光刻 - 光刻 - 刻蚀 (LLE)。与 LELE 相比, LFLE 减少了一步刻蚀工艺, 降低了成本。典型的工艺流程如图 5.9 所示。

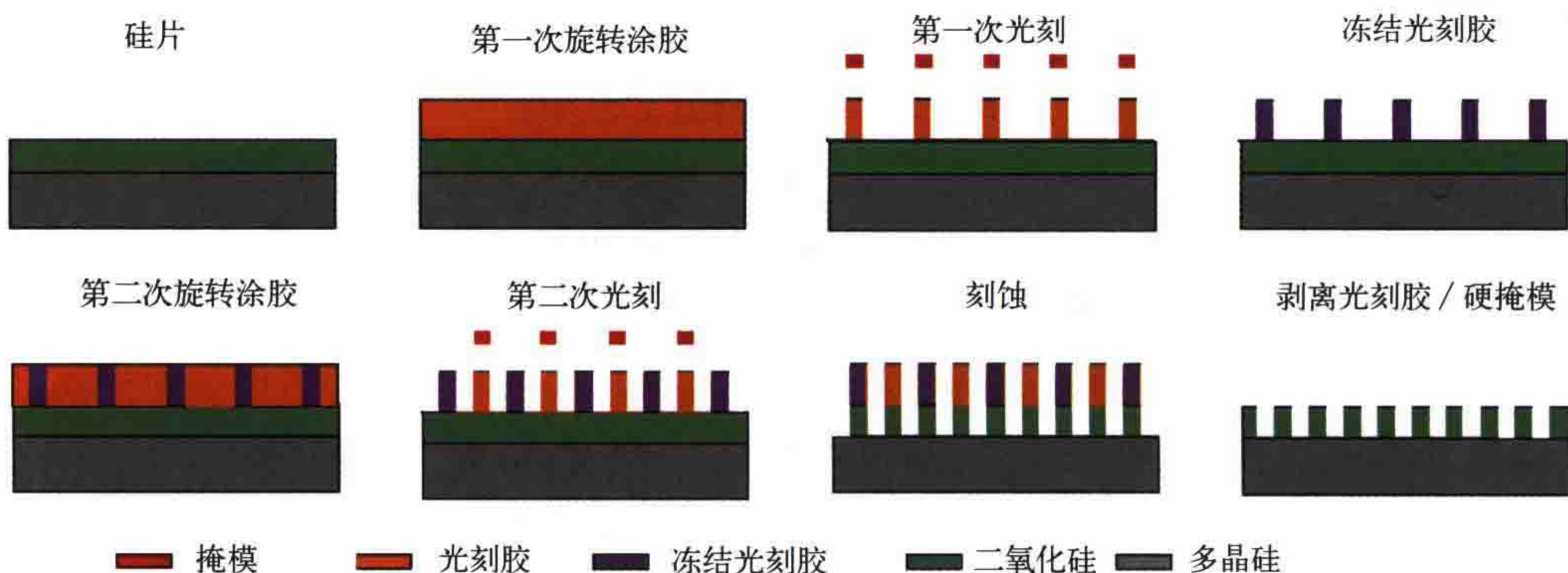


图 5.9 光刻 - 冻结 - 光刻 - 刻蚀工艺步骤

该工艺首先执行标准光刻工艺, 形成半密集光刻胶线条图形。与 LELE 工艺不同, 这些光刻胶线条图形不会被转移到下层中, 而是会被特殊处理, 即冻结处理。经过冻结处理后, 光刻胶线条对第二次光刻工艺不敏感。冻结工艺用到表面固化剂或热固化光刻胶^[22]。另外, 也可以采用波长为 172nm 的光对某些光刻胶材料进行泛曝光, 使之失去活性^[23]。

冻结步骤后, 在已冻结的光刻胶上再次旋涂光刻胶。对新旋涂的光刻胶进行曝光, 将偏移后的线条图形曝光在光刻胶内, 随后显影。第二次光刻工艺不会清除第一步冻结的光刻胶。这样, 第一次冻结住的光刻胶线条和第二次显影后的光刻胶线条组成了后续用于刻蚀工艺的掩模。通过刻蚀工艺将图形转移到氧化硅层。最后剥离所有的光刻胶。

LFLE 的工艺步骤比 LELE 少, 因此它的成本低、产率高, 对设计的灵活性和套刻控制的需求与 LELE 相似。实际制造中, 需要综合考虑 LFLE 两次光刻工艺之间及其与冻结步骤之间的相互影响。这些相互影响包括: 第二次曝光过程中, 第一次光刻形成的光刻胶图形对光的散射, 第一次光刻胶固化过程中的形貌变化; 第一次光刻工艺形成的光刻胶图形对第二次光刻胶旋涂工艺的影响; 第一次光刻及固化工艺对 BARC 性能的影响; 第二次光刻工艺使得第一次旋涂的部分光刻胶发生脱保护和显影反应; 光刻胶之间的混合和扩散; 等等。参考文献 [24, 25] 介绍了其中的部分内容。

5.3.3 自对准双重图形技术

如图 5.10 所示，自对准双重图形（SADP）技术使用光刻胶作为牺牲层，在其左右两侧生成一对间隔层。首先使用标准的光刻工艺制作半密集线条。然后，通过化学气相沉淀（CVD）将间隔层材料（例如 Si_3N_4 ）均匀地沉积到光刻胶上。随后，采用各向异性刻蚀去除间隔层材料。除了附着在牺牲层图形侧上的材料之外，其余的间隔材料都被刻蚀清除。最后，选择性地清除光刻胶材料，用余下的间隔层作为掩模对基底进行刻蚀。

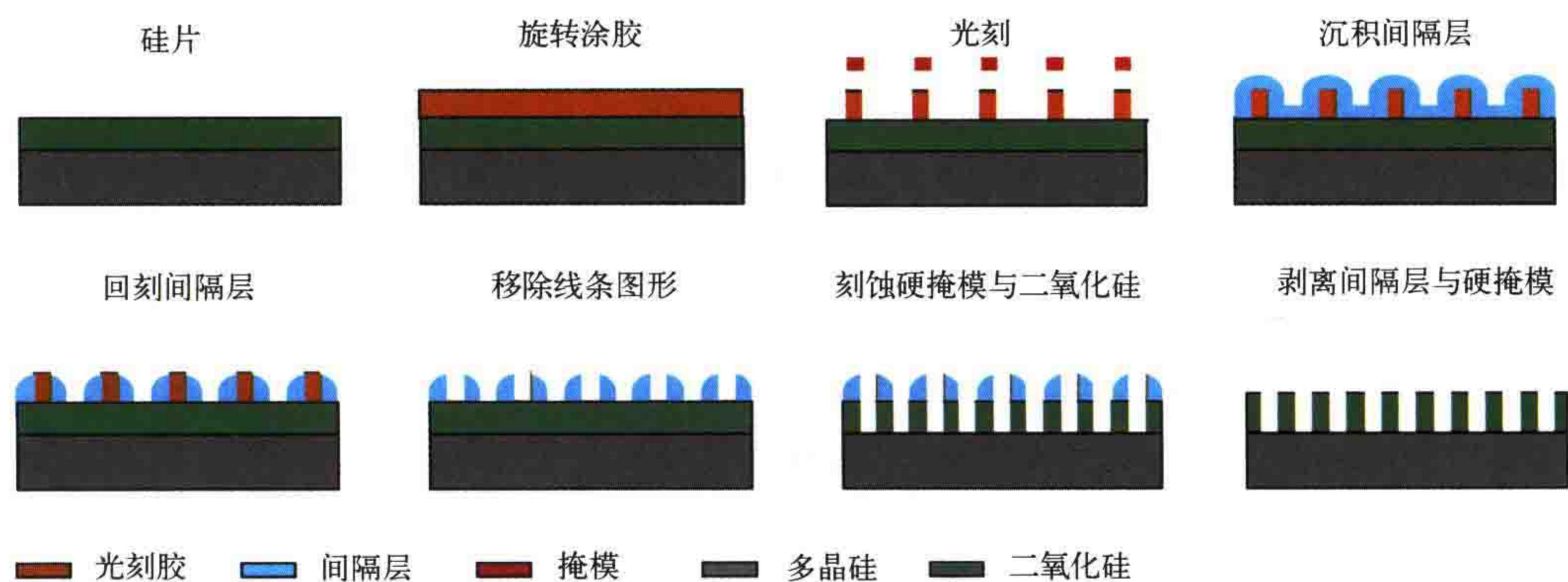


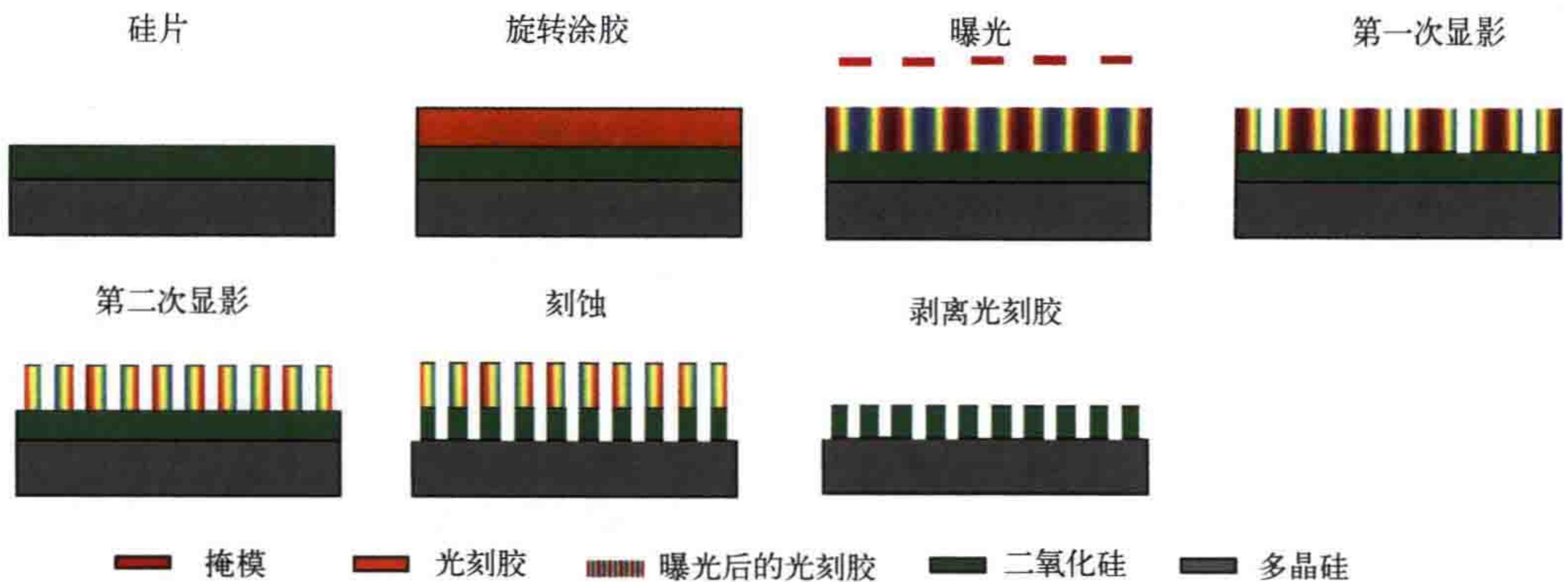
图 5.10 自对准双重图形工艺的步骤。有时该工艺也被称为间隔层双重图形（SDDP）技术

SADP 仅含一次光刻步骤，因此不会受到两次光刻之间套刻误差的影响。但是，间隔层材料的间距会受牺牲层图形（也被称为芯轴图形，mandrel）的关键尺寸（CD）和侧壁均匀性的影响。芯轴图形 CD 的变化将改变间隔层图形的周期，该现象称为周期摆动（pitch walking）^[28]。

图 5.10 所示的工艺步骤也可以应用于具有其他几何形状的牺牲层图形。沿着光刻形成的芯轴图形的侧壁形成间隔层，通过修剪曝光选择性地去除某些间隔层图形，可提高设计的灵活性^[27]。两次 SADP 工艺使得光刻图形的周期进一步减小。将第一次 SADP 形成的间隔层作为第二次 SADP 的芯轴层，可实现自对准四重图形（SAQP）技术。

5.3.4 双重显影技术

Asano 首次提出双重显影（DTD）技术^[29]。该技术分别对光刻胶的高剂量曝光区和低剂量曝光区进行显影，可将图形周期缩小一半以上。图 5.11 描述了 DTD 的基本原理。利用线空图形对光刻胶曝光。光刻胶中酸的浓度介于最低值（蓝色）和最高值（红色）之间；第一次后烘（PEB，图中未显示）触发了脱保护反应，使得光刻胶可溶于碱性显影液，随后进行第一次正显影，形成的沟道具有与掩模版图



相同的周期。第二次显影是负显影，采用有机溶剂制备出位置交错的沟道图形。刻蚀工艺将频率翻倍后的光刻胶沟道图形转移到下层中，最后清除光刻胶。

DTD 是另一种形式的自对准双重图形技术。该技术最吸引人的一点是整个工艺可在涂胶显影机上完成。与 SDDP 技术类似，该技术也受到设计图形的限制。DTD 工艺的效果不仅受光刻胶材料的影响，还取决于第二次后烘过程中脱保护反应后产生的形貌。第二次后烘发生在第一次正显影之后。在第一次显影后增加一次过曝光工艺，可以提高光酸水平，并提高第二次显影后的光刻胶形貌质量^[30]。虽然该技术有许多吸引人的特性，但它还仅停留在实验室阶段，尚未用于商业半导体制造领域。

5.3.5 双重或多重图形技术的选择

前面几节的例子中介绍了几种已在半导体制造中获得应用的重要双重图形技术。除此之外，双重图形技术还包括双极性光刻胶^[31]与自限酸扩散周期拆分技术^[32]。不同双重和多重图形技术的工艺复杂度不同，对芯片设计的影响也不同。

LELE 和 LFLE 包括两次光刻曝光。需要将两次曝光的图形准确对准。由于两次光刻之间的套刻误差会形成 CD 误差^[21]，所以双重图形技术提高了对光刻机套刻精度的要求。尽管 LELE 和 LFLE 可以应用于较为复杂的版图，但版图拆分的难度仍然很大。双重图形技术与光学邻近效应修正技术相互影响，增加了芯片设计的复杂度^[33]。相比于其他双重图形技术，LELE 需要多次光刻和刻蚀，增加了工艺时间和成本。LFLE 仅需一次刻蚀，所有工艺步骤都可以在涂胶显影机上完成，但由于需要用到两种不同的光刻胶，该技术增加了工艺步骤。这些工艺之间相互影响，需要准确地表征并加以控制。

SADP/SAQP 和 DTD 都是自对准双重图形技术，它们仅需一次光刻曝光，降低了对套刻的要求。这些技术都会对设计版图带来一定限制，并有可能需要增加其他

曝光才可以形成最终的图形。将 SADP/SAQP 与剪切掩模结合使用，可用于制备逻辑电路图形，但同样提高了对套刻精度的要求。SADP 还要求逻辑电路要采用网格化设计，图形只能在同一方向上^[34]。

由于材料难以获得，非线性双重曝光技术还处于实验室研究阶段。与之不同，双重 / 多重图形技术对工艺的需求和兼容性已经得到了大量的实验验证和研究^[22, 35]。双重 / 多重图形技术特别是 SADP/SADP 和 LELE，已经在先进制造工艺中获得应用。借助多重图形技术，DUV 光刻可以制备小于 20nm 的图形，但工艺成本也明显增加，并提高了对套刻精度控制的要求。目前人们已开发了适用于多重曝光 / 图形技术的数学框架，可以只研究套刻控制以及套刻带来的影响^[36]。结合双重图形技术，EUV 光刻技术可以制备特征尺寸小于 10nm 的图形，进一步提高了先进光刻的技术水平。

5.4 导向自组装

导向自组装（DSA）利用嵌段共聚物（BCP）的微相分离特性加工微纳结构。油和水等不相溶材料混合在一起时会分层（或称为相分离），形成宏观可见的不同材料层。由化学性质不同的高分子链组成的嵌段共聚物也会在宏观尺度上发生相分离。不同高分子链之间的共价键连接将相分离限制在微米或纳米尺度上。热退火工艺可使无序的二嵌段共聚物发生位置和方向重排，达到热平衡时，两种聚合物之间的界面面积最小，见图 5.12。

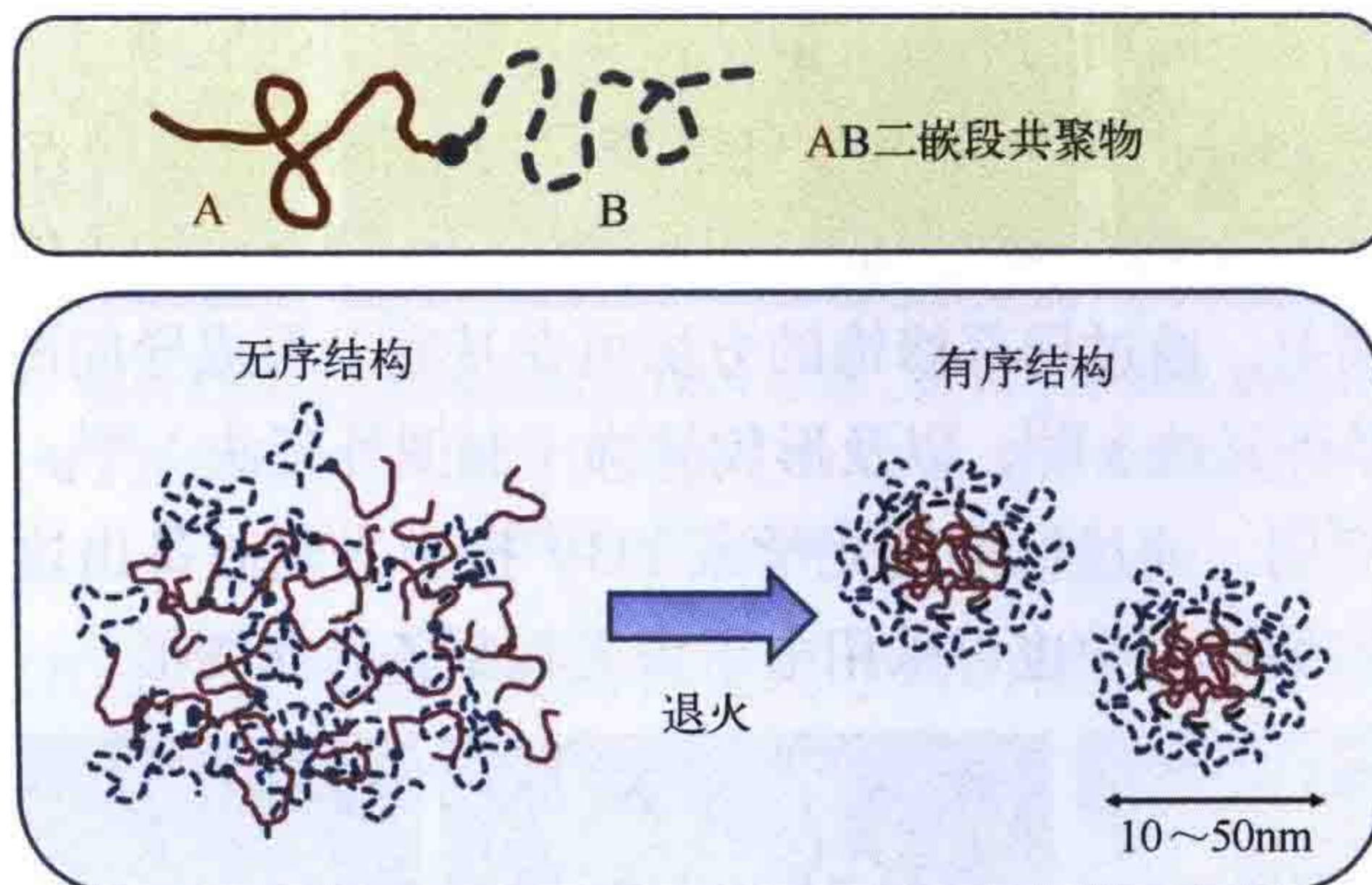


图 5.12 AB 二嵌段共聚物的基本结构，以及退火工艺产生的微相分离。
改编自威斯康星大学 Juan de Pablo 的旧版网页

微相分离产生了空间上呈周期性排列且具有不同结构的微区。图 5.13 展示了 AB 二嵌段共聚物的成分对图形结构的影响。根据共聚物中 A 和 B 的相对数量不同，可以形成球状相、柱状相或层状相（线和空）。图形的长度或特征尺寸（CD）由嵌

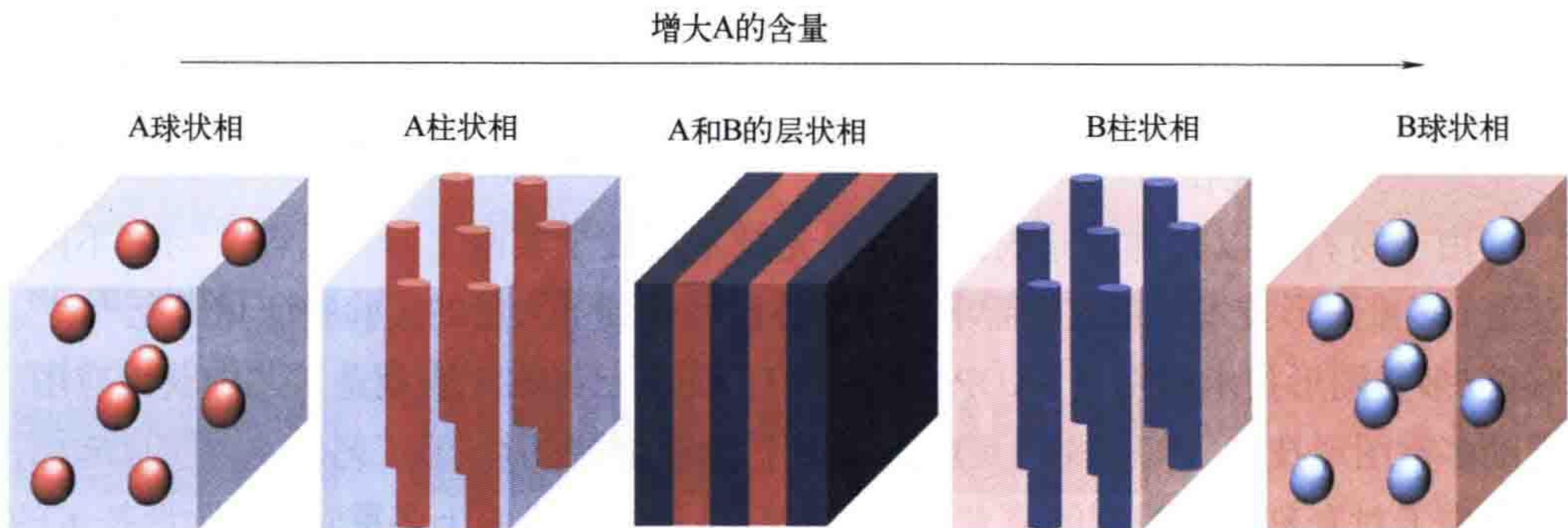


图 5.13 A 聚合物的体积分数不同时, AB 二嵌段共聚物的自组装示例。改编自威斯康星大学 Juan de Pablo 的旧版网页

段共聚物材料的分子大小、聚合度等分子属性决定。因此, DSA 有时也被称为“瓶中尺寸”(CD in bottle)。典型微区的尺寸为 $10 \sim 100\text{nm}$ 。DSA 材料的另一个重要参数是弗洛里 - 哈金斯参数 χ_N , 它是衡量高分子嵌段 A 和 B 之间排斥力大小的量。该参数对自组装的速度及自组装工艺的动力学特性有很大影响。

嵌段共聚物薄膜中的图形形成过程还受表面效应和界面能的影响, 它们决定了嵌段共聚物微观结构的方向。利用成分经过精细配比的无规共聚物分子刷等中性层, 可在竖直方向上形成层状相或柱状相, 这些是光刻感兴趣的结构。薄膜厚度、退火温度和退火时间都是自组装工艺热平衡和图形形貌的重要影响因素。图 5.14 为 PS-*b*-PMMA 嵌段共聚物薄膜形成的图形, 图中所示是实验拍摄的 SEM 图像。

图 5.14 所示的自组装图形不适用于主流光刻。它们可在小区域内实现良好的相分离, 形成包含多个周期的图形。但这种共聚物之间的反应过于微弱, 难以形成大面积图形。可采用导向图形来引导自组装行为, 按照需要的方向和尺寸制备图形。同时还可以改变自组装自然形成的图形的结构, 制备出所需的图形结构。共聚物薄膜沉积在基底上。通过局部修饰的方法可在基底上形成导向图形, 包括选择性的化学修饰(化学外延法)^[41], 以及形貌修饰(制图外延法)^[42]。图 5.15 为导向图形的产生方法示意图。通过标准的光学或 EUV 投影光刻制备出这些导向图形。在 DSA 工艺材料的实验研究中也可采用电子束光刻制备导向图形。

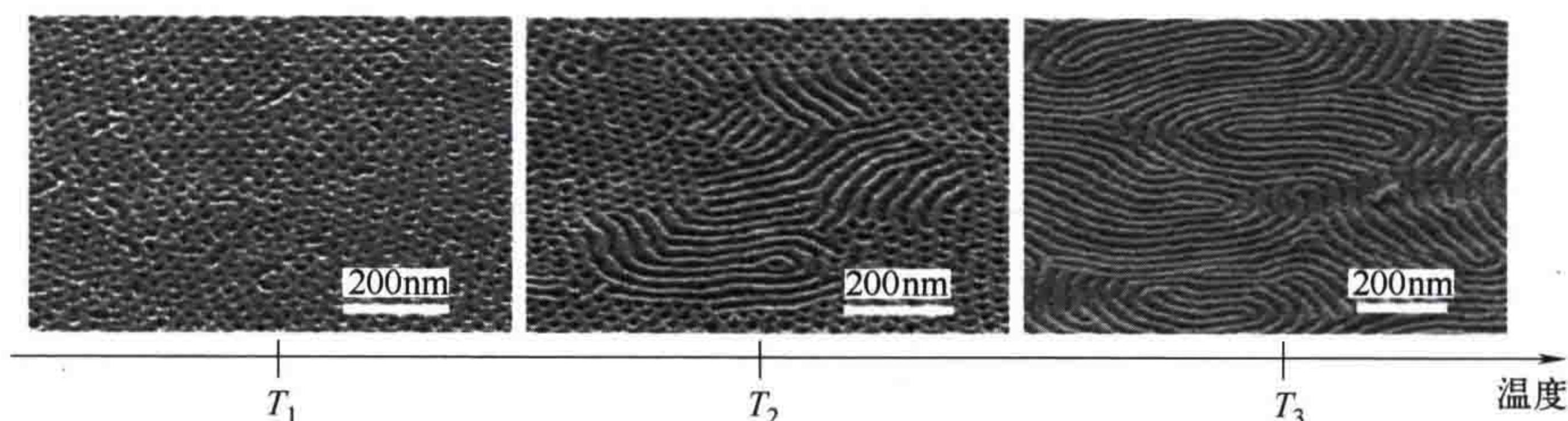


图 5.14 PS-*b*-PMMA 嵌段共聚物薄膜在不同退火温度下形成的图形的 SEM 图像。
转载自参考文献 [40]

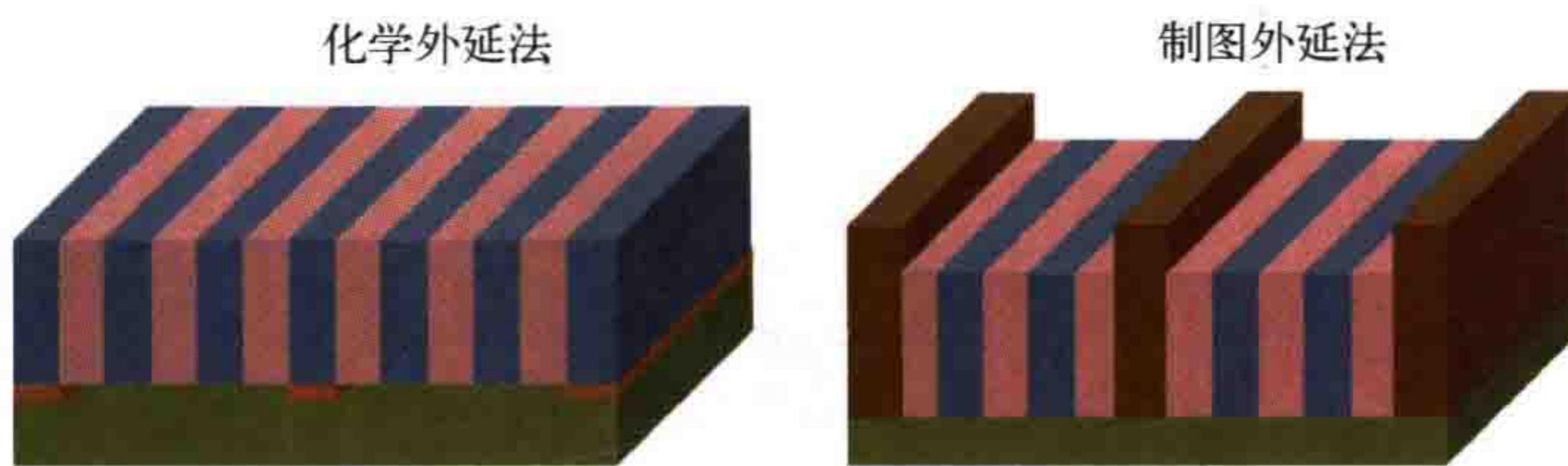


图 5.15 使用化学外延法（左）和制图外延法（右）产生导向图形，引导共聚物自组装的方法

将不同的嵌段共聚物和不同的导向图形组合，可以产生不同形状、不同尺寸或 CD 的图形，增加了图形生成的自由度。虽然如此，仍有很多因素制约了 DSA 的图形制备能力，需要在电路设计时予以考虑。DSA 主要作为现有光刻方法的分辨率增强技术用于实现图形倍增与图形修正。

图形倍增用于增加线空阵列、接触孔阵列或衍射受限成像方法无法制备的小周期图形的密度。图 5.16 为实验中利用不同制图外延法制备的图形。实验中所用的嵌段共聚物为层状相与柱状相嵌段共聚物。利用半密集线导向图形，在不同的 DSA 材料组分、光刻胶，以及退火条件下形成了不同的线空、接触孔阵列结构。这些 DSA 图形的周期比导向图形的周期小很多。

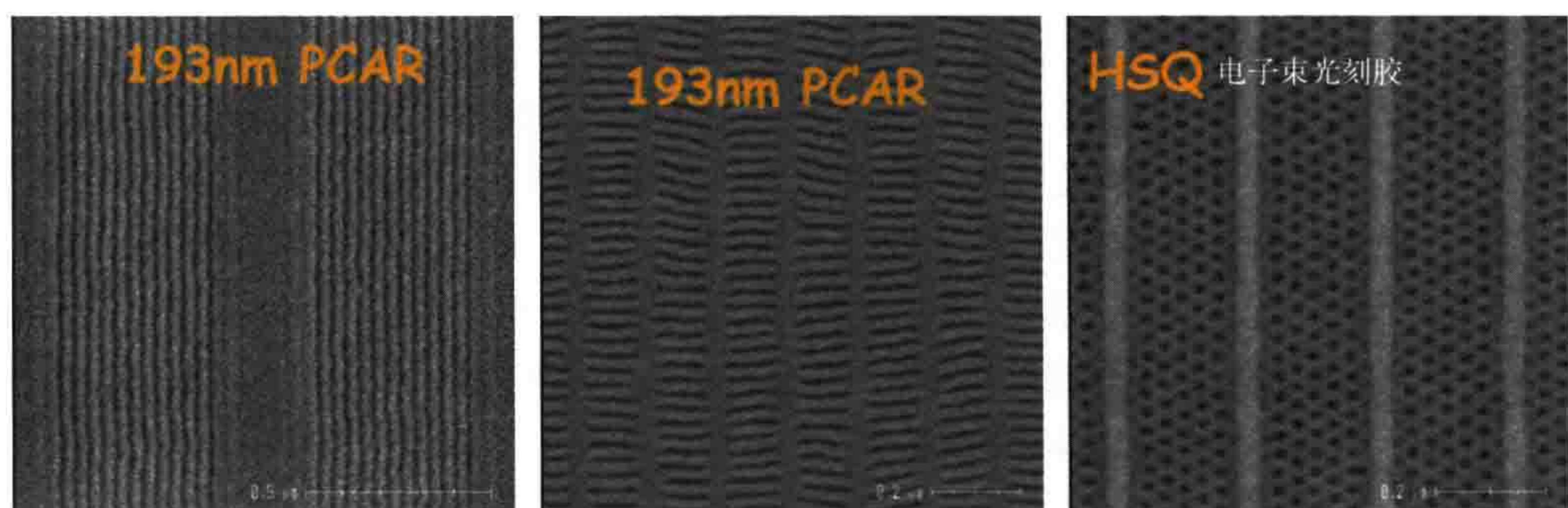


图 5.16 图形倍增。层状相和柱状相聚合物的 DSA 结果。采用了不同的制图外延法生成导向图形，左图和中图采用了正性化学放大 DUV 光刻胶（PCAR），右图采用了 HSQ 电子束光刻胶。

转载自参考文献 [43]

DSA 还可以用于尺寸微缩，提高特征尺寸均匀性，改善线边粗糙度（LER），如图 5.17 所示。左图为利用先进的 193nm 光刻产生制备的 120nm 接触孔。嵌段共聚物 DSA 将这些孔的尺寸缩小到 15nm。最后这些图形被刻蚀到基底上。研究表明这些 DSA 孔的 CD 均匀性明显优于导向图形的 CD 均匀性^[44, 45]。

DSA 图形中的缺陷和不规则形状问题是阻碍 DSA 应用于半导体制造的主要问题之一。这些 DSA 缺陷可以有不同的外观和成因。周期性阵列的错位和旋转可能是由表面中性层的缺陷所致，也可能是由导向图形与 DSA 材料周期或者固有长度不匹配导致的。

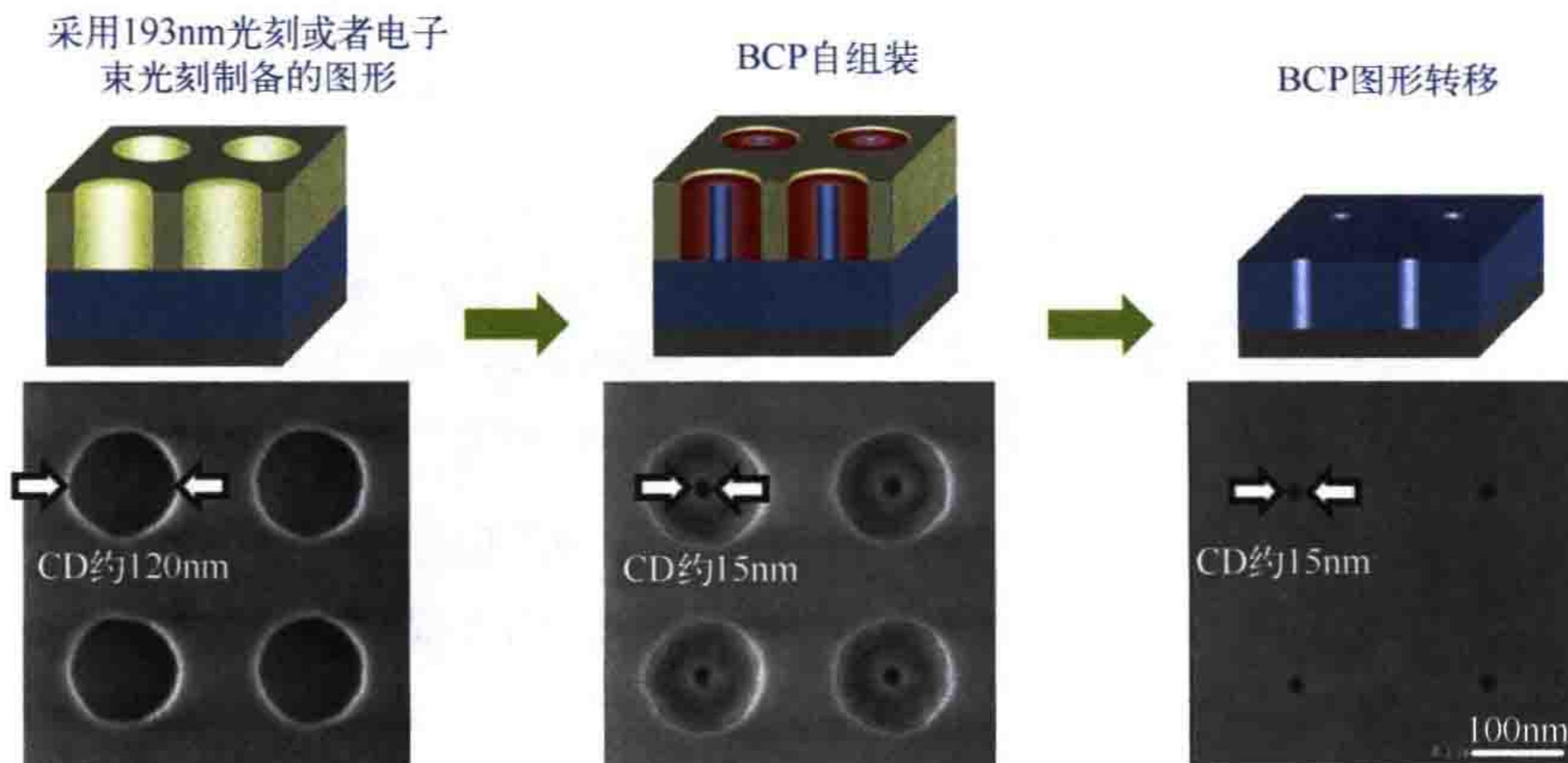


图 5.17 图形修正。用 BCP 缩小和修正接触孔的工艺流程。转载自参考文献 [45]

为学习和优化 DSA 工艺，人们开发了多种建模技术。分子动力学模型和蒙特卡洛（MC）方法可用于研究高分子长链的原子层面信息对材料基本属性、相分离机制和表面作用的影响^[46]。嵌段共聚物有序形态的长度范围为 5 ~ 500nm，使得在原子层面无法完整地描述 DSA 图形的形成过程，因此有必要采用介观描述方法。

粗粒度模型用少量谐振弹簧连接的球形来表示包含几百个原子的集合。这些粒子依照粗粒化的 / 简化的机制相互作用。采用基于粒子的粗粒度模型、基于场理论的粗粒度模型以及它们的组合，可描述典型 DSA 图形的形成过程^[47-51]。利用这种粗粒度模型可以系统地研究发生在几百纳米尺度、分钟量级的复杂三维 DSA 工艺。该模型可描述材料内部界面的分子构象，能够描述复杂的分子结构和包含多种成分的体系。图 5.18 显示了利用粗粒度模型仿真的 DSA 形成图形的动态过程。

由于计算量过大，粗粒度模型不能用于大尺寸光刻图形 DSA 工艺的系统化研究。为此人们提出了 Ohta-Kawasaki 模型^[53] 和界面哈密顿模型^[54] 等简化模型。尽管这些模型在实践应用中只能粗略地描述体系，并且需要利用原子模型或粗粒度模型进行大量的模型标定工作，但它们可以用于工艺性能研究和 DSA 逆问题求解，即用于计算生成目标 DSA 图形所需要的导向图形。Fühner 等人的文章中介绍了协同优化 DUV 光刻与 DSA 的方法^[56]。

嵌段共聚物导向自组装技术是利用现有光刻机制备更微细图形的一种潜在技术方案。DSA 使得利用低成本、材料驱动、自下而上的技术有可能将半导体微缩的极限扩展至亚 10nm 水平。为了将 DSA 变为现有半导体制造技术的有力竞争者，还需要研发具有高 χ 值且小自然周期的新材料^[57]，并降低 DSA 工艺的缺陷密度。

DSA 不但可以制备传统平面工艺中常用的 2D 图形，还可以制备 3D 图形，为很多应用场景提供纳米技术解决方案。DSA 技术不会完全取代光学光刻或 EUV 光刻。结合新材料和新工艺，它有可能利用现有自上而下的光刻技术实现图形密度倍增与缺陷修正。

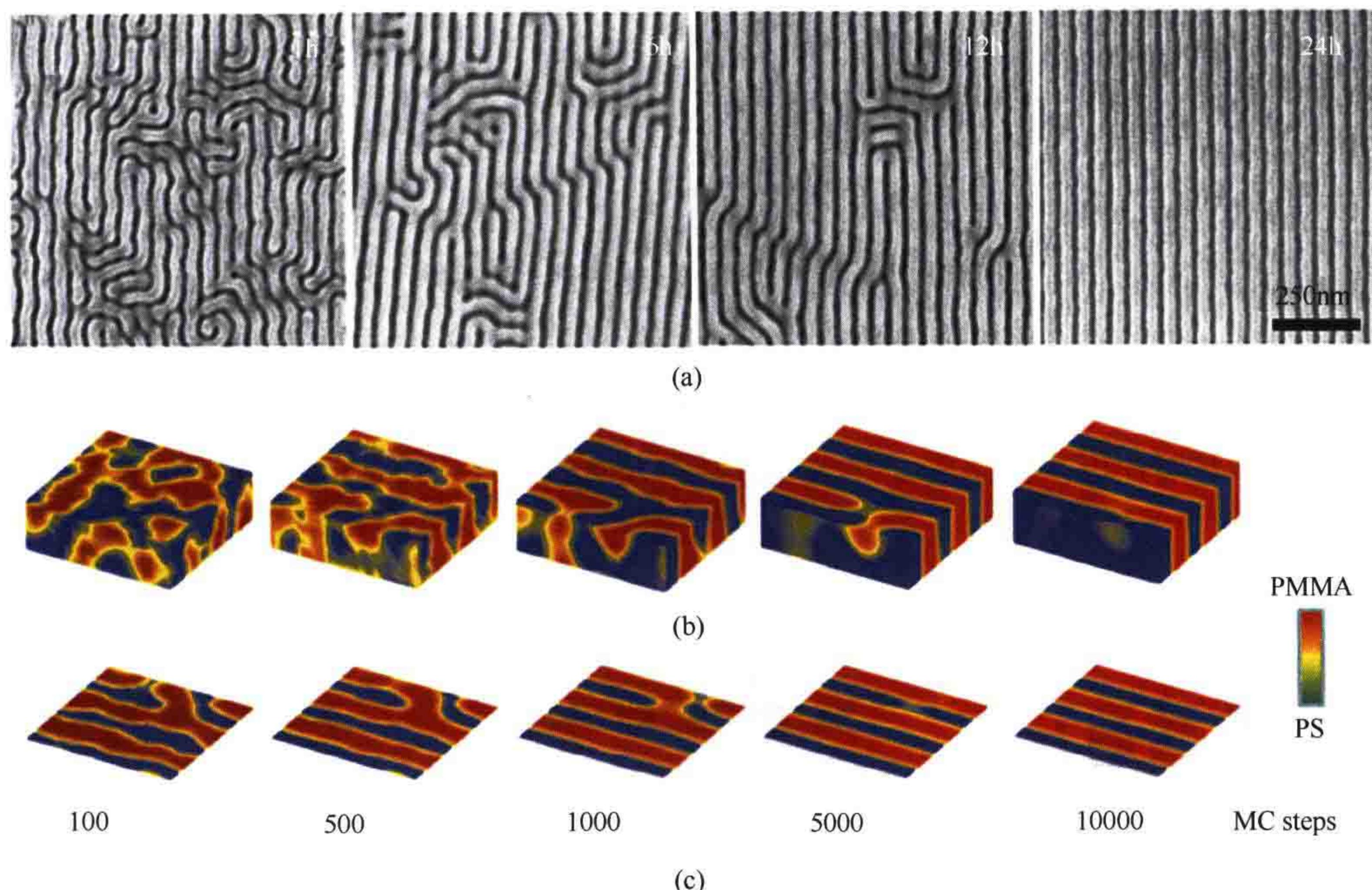


图 5.18 对称 PS-PMMA-PS 三嵌段共聚物的 DSA 动力学过程比较。(a) 粗粒度仿真实验 (50nm 厚薄膜的 SEM 图像);(b) 局部区域的 3D 轮廓图;(c) 靠近底部的采样切片图,反映了基底上的材料实现有序排列的早期过程。经许可转载自参考文献 [52]。

版权 (2012) 美国化学学会 (American Chemical Society)

5.5 薄膜成像技术

最后介绍几种不以提高分辨率为目的的光刻胶与工艺技术。这里介绍的薄膜成像技术主要用于增大焦深 (DoF) 和光刻胶图形的抗刻蚀性。实际上,对光刻胶厚度大小存在相互矛盾的需求。光学投影技术的焦深是限制光刻胶厚度的因素之一,光刻胶厚度应小于焦深。深宽比较大时光刻胶图形容易坍塌。所以光刻胶的厚度还需要满足图形机械稳定性的需求。与这些需求相反,将图形从光刻胶转移到基底上时需要光刻胶具有一定的厚度,以产生足够的抗刻蚀性。前面提到过的硬掩模可以一定程度上满足上述需求。图 5.19 展示了几种薄膜成像方法。这些方法采用特殊的材料和工艺技术提高标准单层光刻胶的功能性。

基于扩散增强硅化光刻胶 (DESIRE) 的上表面成像 (top-surface imaging, TSI) 技术利用含硅化合物 (甲硅烷基化剂) 对曝光后的 DNQ 光刻胶进行化学处理^[59]。该化合物可以扩散进光刻胶曝光区域的顶部,将硅原子混合进顶部的光刻胶中,从而提高抗刻蚀性。该技术可获得几乎竖直的刻蚀侧壁,而且光刻胶底部的

光强分布几乎不会受影响。TSI 提升了 DoF，并降低了来自底部膜层的反射光与衍射光的影响。但是，由于甲硅烷基化的对比度较低，干法显影后图形的线边粗糙度 (LER) 很大^[58]。

图 5.19 中间部分所示的双层光刻胶工艺使用了富含硅的顶部膜层^[60]。该顶部膜层为化学放大负性光刻胶，主要作用是形成图形，可以适用标准的光刻工艺。与 TSI 类似，富含硅的顶部膜层的抗刻蚀性很高，利用这种膜层对其下层材料进行刻蚀，侧壁几乎可以达到完全竖直的状态。利用富含硅的光敏光刻胶可以实现较高的甲硅烷基化对比度。但是成像性能与透射率方面的要求使得顶部膜层中的硅含量不能太高。

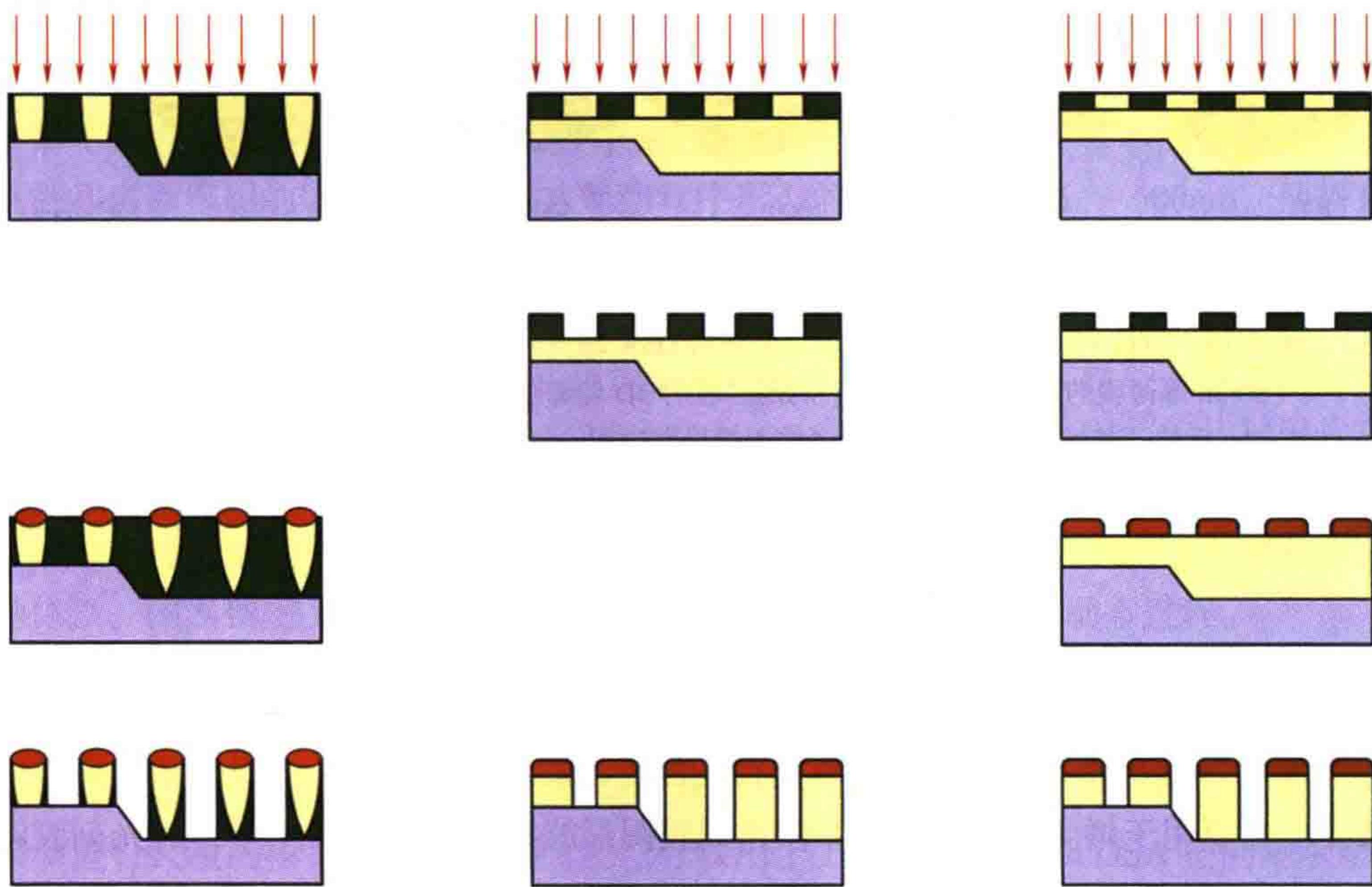


图 5.19 几种典型的薄膜成像工艺对比：上表面成像 (TSI, 左); 双层光刻胶 (中); 化学放大光刻胶线 (CARL, 右)。转载自参考文献 [58]

图 5.19 右侧的化学放大光刻胶线 (CARL) 工艺采用了两种不同的无硅光刻胶层^[58]。首先用标准光刻工艺处理顶部的薄层。随后在液相中进行甲硅烷基化工序，提高薄层的含硅量，形成富含硅的光刻胶薄层，用于成像。这一步还允许接触孔收缩和光刻胶展宽 (化学偏置)。对于半导体制造中的大多数应用来说，CARL 等类似的上表面成像技术的成本过高，很难接受。

5.6 总结

理论分辨率极限 $0.25\lambda/NA$ 仅适用于密集图形。将版图拆分成周期较大的半密集图形，将几个独立的工艺步骤有机地结合在一起，可以实现 $k_1 < 0.25$ 的成像。本节讨论了几种结合了光学非线性性质的多重曝光技术，但目前还没有合适的材料来实现这些技术。

已开发了几种工艺流程，将光刻工艺和其他工艺结合，实现了多重曝光。这些工艺流程的复杂度略有增加。双重图形技术将 193nm 浸没式光刻技术的极限拓展至 45nm 以下。光刻 - 刻蚀 - 光刻 - 刻蚀 (LELE) 只需利用已有的工艺和材料，但会增加工艺 / 设计的复杂性，增加成本，且对对准的要求更严格。自对准双重图形 (SADP) 技术只需要一次光刻，虽然降低了工艺复杂度以及出现套刻问题的概率，但会限制设计的自由度。多重图形技术 (MPT) 可以支持图形继续微缩，但会增加工艺成本和复杂度。

导向自组装 (DSA) 是一种低成本图形微缩方法，但是难以获得自然周期小且低缺陷的高 χ 材料。

硬掩模和上表面成像技术有助于降低对 DoF 的需求、减弱硅片形貌效应。

参 考 文 献

- [1] V. Lucarini, J. J. Saarinen, K. E. Peiponen, and E. M. Vartiainen, *Kramers-Kronig Relations in Optical Materials Research*, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 110, 2005.
- [2] C. L. Henderson, C. G. Willson, R. R. Dammel, and R. A. Synowicki, “Bleaching-induced changes in the dispersion curves of DNQ photoresists,” *Proc. SPIE* **3049**, 585, 1997.
- [3] A. Erdmann, C. L. Henderson, and C. G. Willson, “The impact of exposure induced refractive index changes of photoresists on the photolithographic process,” *J. Appl. Phys.* **89**, 8163, 2001.
- [4] J. Fischer, G. von Freymann, and M. Wegener, “The materials challenge in diffraction-unlimited direct-laser-writing optical lithography,” *Adv. Mater.* **22**, 3578–3582, 2010.
- [5] T. L. Andrew, H. Y. Tsai, and R. Menon, “Confining light to deep subwavelength dimensions to enable optical nanopatterning,” *Science* **324**, 917, 2009.
- [6] T. J. A. Wolf, J. Fischer, M. Wegener, and A.-N. Unterreiner, “Pump-probe spectroscopy on photoinitiators for stimulated-emission-depletion optical lithography,” *Opt. Lett.* **36**, 3188, 2011.

- [7] S. Lee, K. Jen, C. G. Willson, J. Byers, P. Zimmermann, and N. J. Turro, "Materials modeling and development for use in double-exposure lithography applications," *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(1), 11011, 2009.
- [8] R. W. Boyd and S. J. Bentley, "Recent progress in quantum and nonlinear optical lithography," *J. Mod. Opt.* **53**, 713, 2006.
- [9] W. Haske, V. W. Chen, J. M. Hales, W. Dong, S. Barlow, S. R. Marder, and J. W. Perry, "65nm feature sizes using visible wavelength 3-D multiphoton lithography," *Opt. Express* **15**, 3426–3436, 2007.
- [10] S. M. Kuebler, M. Rumi, T. Watanabe, K. Braun, B. H. Cumpston, A. A. Heikal, L. L. Erskine, S. Thayumanavan, S. Barlow, S. R. Marder, and J. W. Perry, "Optimizing two-photon initiators and exposure conditions for three-dimensional microfabrication," *J. Photopolym. Sci. Technol.* **14**, 657–668, 2001.
- [11] J. Byers, S. Lee, K. Jane, P. Zimmerman, N. Turro, and C. G. Willson, "Double exposure materials simulation study of feasibility," in *24th Conference of Photopolymer Science and Technology*, June 2007 Tokyo, 2007.
- [12] E. Yablonovitch and R. B. Vrijen, "Optical projection lithography at half the Rayleigh resolution limit by two-photon exposure," *Opt. Eng.* **38**(2), 334, 1999.
- [13] D. Vincent, "Optical limiting threshold in carbon suspensions and reverse saturable absorber materials," *Appl. Opt.* **40**, 6646–6653, 2001.
- [14] W. G. Oldham, "The use of contrast enhancement layers to improve the effective contrast of positive resist," *IEEE Trans. Electron Devices* **34**, 247–251, 1987.
- [15] F. Shao, G. D. Cooper, Z. Chen, and A. Erdmann, "Modeling of exploration of reversible contrast enhancement layers for double exposure lithography," *Proc. SPIE* **7640**, 76400J, 2010.
- [16] A. Erdmann, P. Evanschitzky, T. Fühner, T. Schnattinger, C. B. Xu, and C. Szmanda, "Rigorous electromagnetic field simulation of two-beam interference exposures for the exploration of double patterning and double exposure scenarios," *Proc. SPIE* **6924**, 692452, 2008.
- [17] T. Ebihara, M. D. Levenson, W. Liu, J. He, W. Yeh, S. Ahn, T. Oga, M. Shen, and H. Msaad, "Beyond $k_1=0.25$ lithography: 70nm L/S patterning using KrF scanners," *Proc. SPIE* **5256**, 985–994, 2003.
- [18] M. Maenhoudt, J. Versluijs, H. Struyf, J. van Olmen, and L. van Hove, "Double patterning scheme for sub-0.25 k_1 single damascene structures at NA=0.75, $\lambda=193\text{nm}$," *Proc. SPIE* **5754**, 1508–1518, 2005.
- [19] M. Padmanaban, J. Cho, T. Kudo, D. Rahman, H. Yao, D. McKenzie, A. Dioses, S. Mullen, E. Wolfer, K. Yamamoto, Y. Cao, and Y. Her, "Progress in spin-on hard mask materials for advanced lithography," *J. Photopolym. Sci. Technol.* **27**(4), 503–509, 2014.

- [20] M. Drapeau, V. Wiaux, E. Hendrickx, S. Verhaegen, and T. Machida, “Double patterning design split implementation and validation for the 32nm node,” *Proc. SPIE* **6521**, 652109, 2007.
- [21] A. J. Hazelton, S. Wakamoto, S. Hirukawa, M. McCallum, N. Magome, J. Ishikawa, C. Lapeyere, I. Guilmeau, S. Barnola, and S. Gaugiran, “Double-patterning requirements and prospects for optical extension without double patterning,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(1), 11003, 2009.
- [22] Y. C. Bae, Y. L. Liu, T. Cardolaccia, J. C. McDermott, P. Trefonas, K. Spizuoco, M. Reilly, A. Pikon, L. Joesten, G. G. Zhang, G. G. Barclay, J. Simon, and S. Gaugiran, “Materials for single-etch double patterning process: Surface curing agent and thermal cure resist,” *Proc. SPIE* **7273**, 727306, 2009.
- [23] M. Yamaguchi, T. Wallow, Y. Yamada, R. H. Kim, J. Kye, and H. J. Levinson, “A study of photoresist pattern freezing for double imaging using 172nm VUV flood exposure,” in *25th International Conference of Photopolymer Science and Technology*, 2008.
- [24] 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.
- [25] S. Robertson, P. Wong, P. De Bisschop, N. Vandenbroeck, and V. Wiaux, “Interactions between imaging layers during double-patterning lithography,” *Proc. SPIE* **8326**, 83260B, 2012.
- [26] Y.-K. Choi, T.-J. King, and C. Hu, “A spacer patterning technology for nanoscale CMOS,” *IEEE Trans. Electron Devices* **49**, 436, 2002.
- [27] A. Carlson and T.-J. K. Liu, “Low-variability negative and iterative spacer processes for sub-30-nm lines and holes,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(1), 11009, 2009.
- [28] R. Chao, K. K. Kohli, Y. Zhang, A. Madan, G. R. Muthinti, A. J. Hong, D. Conklin, J. Holt, and T. C. Bailey, “Multitechnique metrology methods for evaluating pitch walking in 14 nm and beyond FinFETs,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **13**(4), 1–9, 2014.
- [29] M. Asano, “Sub-100 nm lithography with KrF exposure using multiple development method,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 6999–7003, 1999.
- [30] C. Fonseca, M. Somervell, S. Scheer, Y. Kuwahara, K. Nafus, R. Gronheid, S. Tarutani, and Y. Enomoto, “Advances in dual-tone development for pitch doubling,” *Proc. SPIE* **7640**, 76400E, 2010.
- [31] X. Gu, C. M. Bates, Y. Cho, T. Kawakami, T. Nagai, T. Ogata, A. K. Sundaresan, N. J. Turro, R. Bristol, P. Zimmerman, and C. G. Willson, “Photobase generator assisted pitch division,” *Proc. SPIE* **7639**, 763906, 2010.
- [32] J. Fuhrmann, A. Fiebach, M. Uhle, A. Erdmann, C. Szmanda, and C. Truong, “A model of self-limiting residual acid diffusion for pattern doubling,” *Microelectron. Eng.* **86**, 792, 2009.

- [33] K. Lucas, C. Cork, A. Miloslavsky, G. Luc-Pat, L. Barnes, J. Hapli, J. Lewellen, G. Rollins, V. Wiaux, and S. Verhaegen, “Double-patterning interactions with wafer processing, optical proximity correction, and physical design flow,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **8**(3), 33002, 2009.
- [34] M. C. Smayling, K. Tsujita, H. Yaegashi, V. Axelrad, R. Nakayama, K. Oyama, and A. Hara, “11nm logic lithography with OPC-Lite,” *Proc. SPIE* **9052**, 90520M, 2014.
- [35] M. Maenhoudt, R. Gronheid, N. Stepanenko, T. Matsuda, and D. Vangoidsenhoven, “Alternative process schemes for double patterning that eliminate the intermediate etch step,” *Proc. SPIE* **6924**, 69240P, 2008.
- [36] A. H. Gabor and N. M. Felix, “Overlay error statistics for multiple-exposure patterning,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **18**(2), 1–16, 2019.
- [37] M. J. Fasolka, “Block copolymer thin films: Physics and applications,” *Annu. Rev. Mater. Res.* **31**, 323–355, 2001.
- [38] H.-C. Kim and W. D. Hinsberg, “Surface patterns from block copolymer self-assembly,” *J. Vac. Sci. Technol. A* **26**, 1369, 2008.
- [39] R. A. Farrell, T. G. Fitzgerald, D. Borah, J. D. Holmes, and M. A. Morris, “Chemical interactions and their role in the microphase separation of block copolymer thin films,” *Int. J. Mol. Sci.* **10**, 3671–3712, 2009.
- [40] X. Chevalier, R. Tiron, T. Upreti, S. Gaugiran, C. Navarro, S. Magnet, T. Chevolleau, G. Cunges, G. Fleury, and G. Hadzioannou, “Study and optimization of the parameters governing the block copolymer self-assembly: Toward a future integration in lithographic process,” *Proc. SPIE* **7970**, 79700Q, 2011.
- [41] S. O. Kim, H. H. Solak, M. P. Stoykovich, N. J. Ferrier, J. J. de Pablo, and P. F. Nealey, “Epitaxial self-assembly of block copolymers on lithographically defined nanopatterned substrates,” *Nature* **424**, 411–414, 2003.
- [42] R. A. Segalman, H. Yokoyama, and E. J. Kramer, “Graphoepitaxy of spherical domain block copolymer films,” *Adv. Mater.* **13**, 1152–1155, 2001.
- [43] R. Tiron, S. Gaugiran, J. Pradelles, H. Fontaine, C. Couderc, L. Pain, X. Chevalier, C. Navarro, T. Chevolleau, G. Cunge, M. Delalande, G. Fleury, and G. Hadzioannou, “Pattern density multiplication by direct self assembly of block copolymers: Toward 300mm CMOS requirements,” *Proc. SPIE* **8323**, 83230O, 2012.
- [44] C. Bencher, H. Yi, J. Zhou, M. Cai, J. Smith, L. Miao, O. Montal, S. Blitshtein, A. Lavia, K. Dotan, H. Dai, J. Y. Cheng, D. P. Sanders, M. Tjio, and S. Holmes, “Directed self-assembly defectivity assessment (part II),” *Proc. SPIE* **8323**, 83230N, 2012.

- [45] R. Tiron, A. Gharbi, M. Argoud, X. Chevalier, J. Belledent, P. P. Barros, I. Servin, C. Navarro, G. Cunge, S. Barnola, L. Pain, M. Asai, and C. Pieczulewski, “The potential of block copolymer directed self-assembly for contact hole shrink and contact multiplication,” *Proc. SPIE* **8680**, 868012, 2013.
- [46] N. C. Karayiannis, V. G. Mavrantzas, and D. N. Theodorou, “A novel Monte Carlo scheme for the rapid equilibration of atomistic model polymer systems of precisely defined molecular architecture,” *Phys. Rev. Lett.* **88**, 105503, 2002.
- [47] M. Müller, K. Katsov, and M. Schick, “Coarse-grained models and collective phenomena in membranes: Computer simulation of membrane fusion,” *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics* **41**, 1441, 2003.
- [48] M. W. Matsen, *Self-Consistent Field Theory and Its Applications in Soft Matter, Volume 1: Polymer Melts and Mixtures*, 83. Wiley-VCH, Weinheim, 2006.
- [49] D. Q. Pike, F. A. Detcheverry, M. Müller, and J. J. de Pablo, “Theoretically informed coarse grain simulations of polymeric systems,” *J. Chem. Phys.* **131**, 84903, 2009.
- [50] J. J. de Pablo, “Coarse-grained simulations of macromolecules: From DNA to nanocomposites,” *Annu. Rev. Phys. Chem.* **62**, 555–574, 2011.
- [51] R. A. Lawson, A. J. Peters, P. J. Ludovice, and C. L. Henderson, “Tuning domain size of block copolymers for directed self assembly using polymer blending: Molecular dynamics simulation studies,” *Proc. SPIE* **8680**, 86801Z, 2013.
- [52] S. Ji, U. Nagpal, G. Liu, S. P. Delcambre, M. Müller, J. J. de Pablo, and P. F. Nealey, “Directed assembly of non-equilibrium ABA triblock copolymer morphologies on nanopatterned substrates,” *ACS Nano* **6**, 5440–5448, 2012.
- [53] T. Ohta and K. Kawasaki, “Equilibrium morphology of block copolymer melts,” *Macromolecules* **19**, 2621–2632, 1986.
- [54] E. W. Edwards, M. F. Montague, H. H. Solak, C. J. Hawker, and P. F. Nealey, “Precise control over molecular dimensions of block-copolymer domains using the interfacial energy of chemically nanopatterned substrates,” *Adv. Mater.* **16**, 1315–1319, 2004.
- [55] K. Yoshimoto, K. Fukawatase, M. Ohshima, Y. Naka, S. Maeda, S. Tanaka, S. Morita, H. Aoyama, and S. Mimotogi, “Optimization of directed self-assembly hole shrink process with simplified model,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **13**(3), 31305, 2014.
- [56] T. Fühner, U. Welling, M. Müller, and A. Erdmann, “Rigorous simulation and optimization of the lithography/directed self-assembly co-process,” *Proc. SPIE* **9052**, 90521C, 2014.
- [57] J. Zhang, M. B. Clark, C. Wu, M. Li, P. Trefonas, and P. D. Hustad,

- “Orientation control in thin films of a high-chi block copolymer with a surface active embedded neutral layer,” *Nano Lett.* **16**, 728–735, 2016.
- [58] E. Richter, M. Sebald, L. Chen, G. Schmid, and G. Czech, “CARL: Advantages of thin-film imaging for leading-edge lithography,” *Materials Science in Semiconductor Processing* **5**, 291, 2003.
- [59] F. Coopmans and B. Roland, “DESIRE: A novel dry developed resist system,” *Proc. SPIE* **631**, 34, 1986.
- [60] Q. Lin, A. D. Katnani, T. A. Brunner, C. DeWan, C. Fairchok, D. C. LaTulipe, J. P. Simons, K. E. Petrillo, K. Babich, D. E. Seeger, M. Angelopoulos, R. Sooriyakumaran, G. M. Wallraff, and D. C. Hofer, “Extension of 248-nm optical lithography: A thin film imaging approach,” *Proc. SPIE* **333**, 278, 1998.

第 6 章 ➤ 极紫外光刻

极紫外 (EUV) 光谱 / 软 X 射线电磁辐射谱是指波长为 $5 \sim 30\text{nm}$ 的波谱。与曝光波长为 248nm 和 193nm 的深紫外 (DUV) 光刻类似, EUV 光刻也使用投影物镜对掩模进行缩小成像。由于 EUV 光刻的曝光波长短, 其分辨率明显高于 DUV 光刻。由于分辨率高且与现有光刻技术高度相似, EUV 光刻成为继 193nm 浸没式光刻之后非常有吸引力的下一代光刻技术。

从 DUV 波段光学光刻到 EUV 光刻发生了几个重要变化^[1, 2]。第一, 需要输出功率高、寿命长且稳定可靠的光源。业内已开发了多种激光等离子体或放电等离子体光源。第二, 由于缺乏在 EUV 波段透过率足够高的光学材料, 照明 / 投影光学系统不能采用传统的透射式透镜, 必须替换为反射式光学元件, 对掩模和 EUV 光刻系统的成像特性产生了重要影响。第三, 需要高灵敏度、高分辨率的光刻胶材料。高能 EUV 光子改变了入射光与光刻胶相互作用的方式。光子噪声、二次电子散射效应和其他现象都会影响光刻胶的灵敏度、分辨率和线边粗糙度。

EUV 光刻系统的曝光波长取决于光源与材料。目前使用的波长为 13.5nm 。图 6.1 为极紫外投影光刻系统的原理图。收集镜将激光等离子体辐射出的 EUV 光聚



图 6.1 蔡司公司的 EUV 光刻成像系统示意图。转载自参考文献 [3]

焦到中继焦点上。照明系统采用四面反射镜对 EUV 光进行整形，并照明掩模台上的反射式掩模。投影物镜系统由 6 面反射镜组成，将掩模 $4\times$ 缩小成像至硅片上的光刻胶内。因为所有材料（包括空气）对 13.5nm 光的透射率都不足，所以系统需要运行在真空环境中。

20 世纪 80 年代后半期，Kinoshita 等人^[4]、Hawryluk 和 Seppala^[5]首次建议将软 X 射线或 EUV 辐射用于投影光刻。Tony Yen 在 2016 年的 SPIE 先进光刻技术研讨会上系统地回顾了这项技术的发展历史^[6]。2012 年，ASML 公司第一台数值孔径为 0.33 的预量产光刻机交付给半导体制造商^[7]。7 年后，三星公司使用 EUV 光刻技术制造了世界上第一块半导体芯片。研发更高数值孔径的 EUV 光刻技术，以及适合图形转移的材料和工艺，是未来半导体器件继续微缩的关键。

本章总结了极紫外光刻技术的光源、光学系统、光刻胶、掩模缺陷等方面的内容。首先介绍 EUV 光源，然后介绍多层膜反射镜。多层膜反射镜是极紫外光刻掩模和成像系统的重要组成部分。以反射式掩模和反射镜取代透射式掩模和透镜，对掩模和成像产生了重要影响。6.5 节概述了曝光和光刻胶处理过程中观察到的效应以及它们对光刻性能的限制。6.6 节讨论了极紫外光刻特有的多层膜缺陷。本章最后对高 NA 极紫外光刻系统的发展趋势和先进掩模结构进行了展望。

6.1 光源

首次 EUV 光刻实验使用了同步加速器自由电子激光。由于功率低且成本高，这种同步加速器光源不适用于大规模量产。等离子体中的高能电子态也可以产生 EUV 辐射。可利用氙 (Xe)、锡 (Sn) 和锂 (Li) 等靶材形成等离子体。历史上，放电等离子体光源和激光等离子体光源都曾被用于 EUV 光刻^[8-10]。转换效率——即在窄波长范围内 EUV 光的功率与输入的电或光功率的比值——取决于靶材、靶的形状，以及等离子体密度等参数。为达到 2% ~ 5% 的转换效率，较新一些的光源系统普遍使用锡作为靶材。

图 6.2 为放电等离子体 (DPP) 光源和激光等离子体 (LPP) 光源示意图。通过进料口或激光烧蚀技术，将靶材从锡阴极输送到 DPP 的阴极和阳极之间。通过放电 (DPP) 或高功率 CO₂ 激光器 (LPP) 产生等离子体。出射的 EUV 光的峰值波长为 13.5nm。等离子体也会产生带外 (OOB) EUV 辐射，以及紫外光和可见光。采用薄膜、多层膜反射镜或特殊光栅等光谱纯化滤波器可减少进入照明系统的带外辐射。DPP 和 LPP 光源都会产生颗粒 / 微液滴、离子以及电子等高速运动的碎屑。这些碎屑可能会损坏照明和投影系统的光学元件。箔片陷阱可消除或者减少光路中

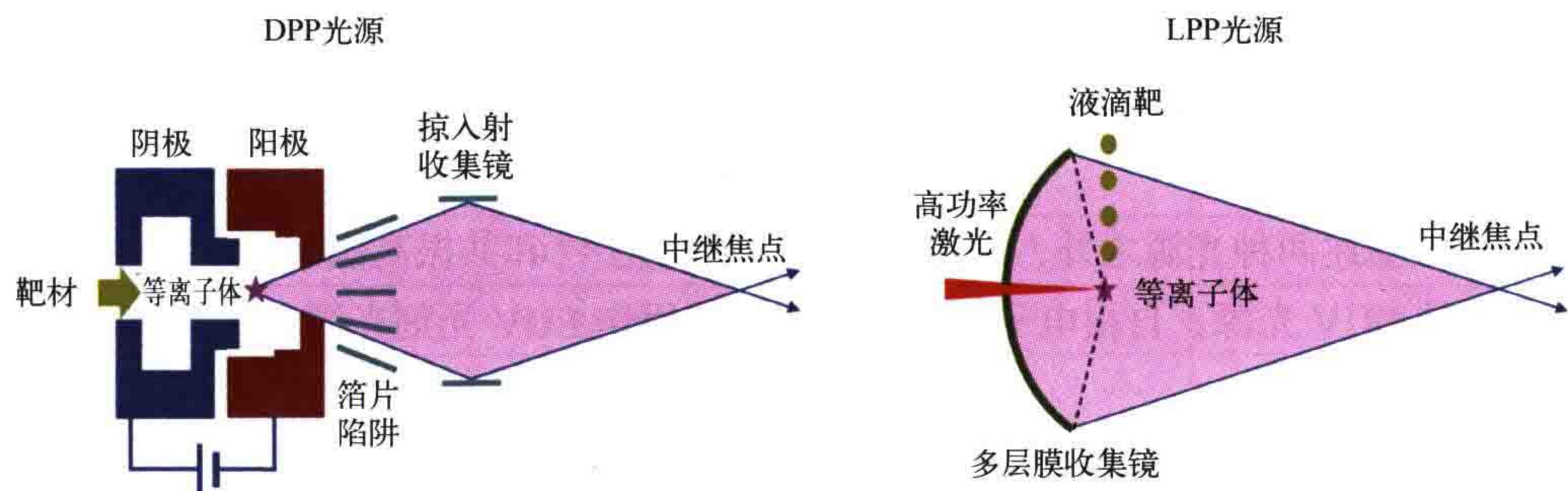


图 6.2 放电等离子体光源（左）和激光等离子体光源（右）示意图。改编自参考文献 [11]

的碎屑。多层膜或掠入射收集镜将除污之后的 EUV 光反射到光源与照明系统之间的中继焦点。

DPP 和 LPP 光源的转换效率低，说明大部分输入功率转换为了带外辐射、碎屑和热损耗。所以会产生高热负载。如何有效处理热负载成为这两种 EUV 光源共同面临的挑战。碎屑会对反射镜以及等离子体周围的其他光源模块造成损伤，严重影响极紫外光源的寿命与稳定性。转换效率、光谱滤波器、碎屑缓减系统以及高热负载处理方法制约了 EUV 光源的输出功率。另一方面，产率指标要求中继焦点的输出功率最低要达到 200W。输出功率的稳定性与光源的寿命也是 EUV 光源研发面临的挑战^[9, 10]。上述问题以及光源性能的不足，使得 EUV 光刻技术应用于半导体制造的时间推迟了很多年。

最先进极紫外光刻机采用了 LPP 光源和预脉冲技术，如图 6.3 所示。预脉冲（PP）的作用是增大锡液滴的体积，改善锡液滴与主脉冲（MP）的相互作用效

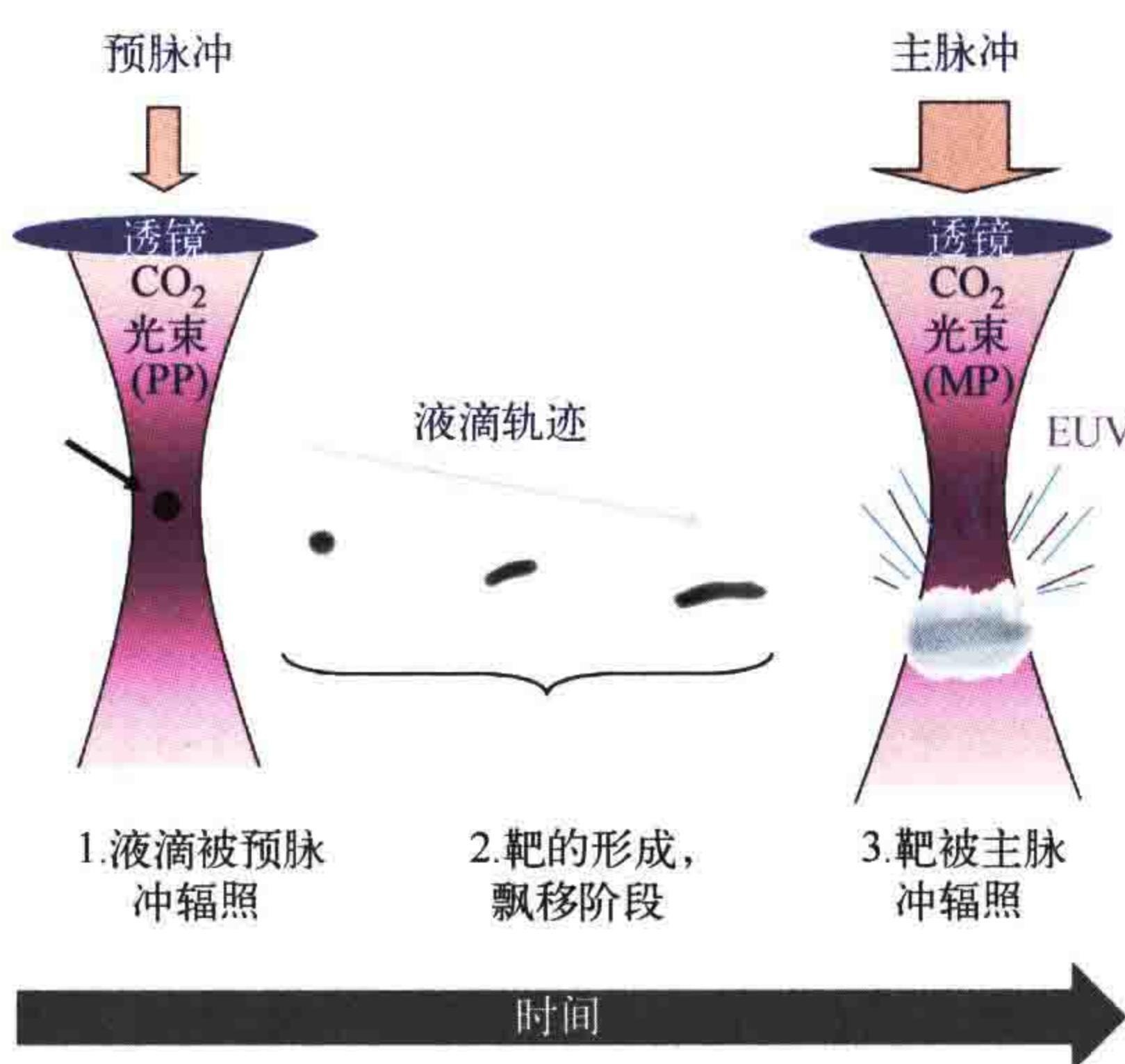


图 6.3 预脉冲技术概念图。经过 De Gruyter 许可，改编自参考文献 [10]。
由 ASML 公司 Igor Fomenkov 提供

果。完美的时空同步以及预脉冲技术显著提高了转换效率，使得 EUV 光源的输出功率超过了 250W。预脉冲技术是将 EUV 光刻技术推向半导体制造过程中的重要一步^[10]。

除了上述两种光源之外，还存在自由电子激光^[12] 和共振高次谐波激光^[13] 等其他类型的 EUV 光源。自由电子激光未来有可能用作 EUV 光刻光源。高次谐波激光可用于 EUV 计量。

6.2 EUV 和多层膜薄膜中的光学材料特性

高能极紫外光子与原子的内壳层发生作用，所以材料在 EUV 辐射光谱中的光学特性由材料的原子成分决定，与具体的化学作用无关。复折射率 \tilde{n} 可以写成^[14-16]：

$$\begin{aligned}\tilde{n} &= 1 - \frac{N_a r_e \lambda^2}{2\pi} (f_1 - i f_2) \\ &= 1 - \delta + i \beta \\ &= n + i k\end{aligned}\quad (6.1)$$

式中， N_a 是单位体积内的原子数； r_e 是经典的电子半径； λ 是波长； f_1 、 f_2 为双层膜中两种材料的原子散射因子；系数 δ 和 β 已列为表格^[17]。CXRO^[18] 的网页发布的数据被作为 EUV 光学材料性能的参考标准。 δ 和 β 的值小于 1，具体大小取决于沉积条件和材料中的杂质。式 (6.1) 第三行中的字母为本书中使用的折射率的实部 n 和消光系数 k 。

表 6.1 给出了所选材料在 13.5nm 波长下的光学特性。穿透深度 d_p ，即材料内部光强降至初始值的 $1/e$ (约 37%) 时的深度，可根据下式计算：

$$d_p = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (6.2)$$

式中， α 是材料的吸收系数。

表 6.1 13.5nm 波长光学材料的光学参数。 n 是复折射率的实部 ($1-\delta$)， k 是消光系数 (β)， d_p 是穿透深度。 δ 和 β 的值来源于 CXRO 的数据库^[18]。TaBN 是一种典型的掩模吸收层材料

材料	n	k	d_p/nm
碳	0.961573	$6.91e^{-3}$	$1.55e^{+2}$
氢	0.999995	$1.45e^{-7}$	$7.41e^{+6}$
氟	0.999971	$1.88e^{-5}$	$5.14e^{+4}$

续表

材料	n	k	d_p/nm
钼	0.923791	6.43e^{-3}	1.67e^{+2}
氧	0.999973	1.22e^{-5}	8.81e^{+4}
镍	0.948223	7.27e^{-2}	1.48e^{+1}
氮	0.999976	7.01e^{-6}	1.53e^{+5}
钌	0.886360	1.71e^{-2}	6.29e^{+1}
硅	0.999002	1.83e^{-3}	5.87e^{+2}
钽	0.942904	4.08e^{-2}	2.63e^{+1}
TaBN	0.95	3.10e^{-2}	3.46e^{+1}
锆	0.958964	3.76e^{-2}	2.86e^{+1}

虽然表中的数据不全，但已可以说明 EUV 光刻在材料方面面临的一些挑战。在大气压力下，EUV 光在气体中的穿透深度在几毫米以内。固体材料的典型 d_p 值小于 1mm。需要采用几十纳米厚的镍等金属材料层作为 EUV 掩模吸收层。

所有 EUV 光谱范围内的材料都具有相似的光学性质，都会吸收 EUV 光，限制了元件对 EUV 光的操控能力。在极紫外光谱范围内无法使用类似透镜的折射元件。透射光栅、波带片或针孔等衍射元件的衍射效率低，虽然无法应用于高产率光刻成像系统，但可用于计量和一些特殊的应用场合。

为实现高反射率，需要采用大的入射角（掠入射反射镜）或者能够使来自反射元件不同界面（多层膜反射镜）的反射光发生相长干涉。EUV 成像光学系统和掩模采用多层膜结构。该多层膜由双层膜周期性地堆叠而成（见图 6.4）。布拉格定理给出了不同界面的反射光发生相长干涉需要满足的条件：

$$m\lambda=2d\cos\theta \quad (6.3)$$

式中， d 为双层膜的厚度； θ 为入射角； λ 为波长； m 为整数。所需双层膜的数量与可实现的反射率值取决于双层膜两种材料折射率实部之间的差异。为了使两种材料的光学性质差异足够大，双层膜常采用具有高低两种原子序数的材料。选择材料时还需要考虑含突变界面连续薄膜的制造能力等其他方面的技术要求^[19]。目前的掩模中使用了 40 对钼（Mo）和硅（Si）组成的双层膜。从表 6.1 的数据可以看出，这

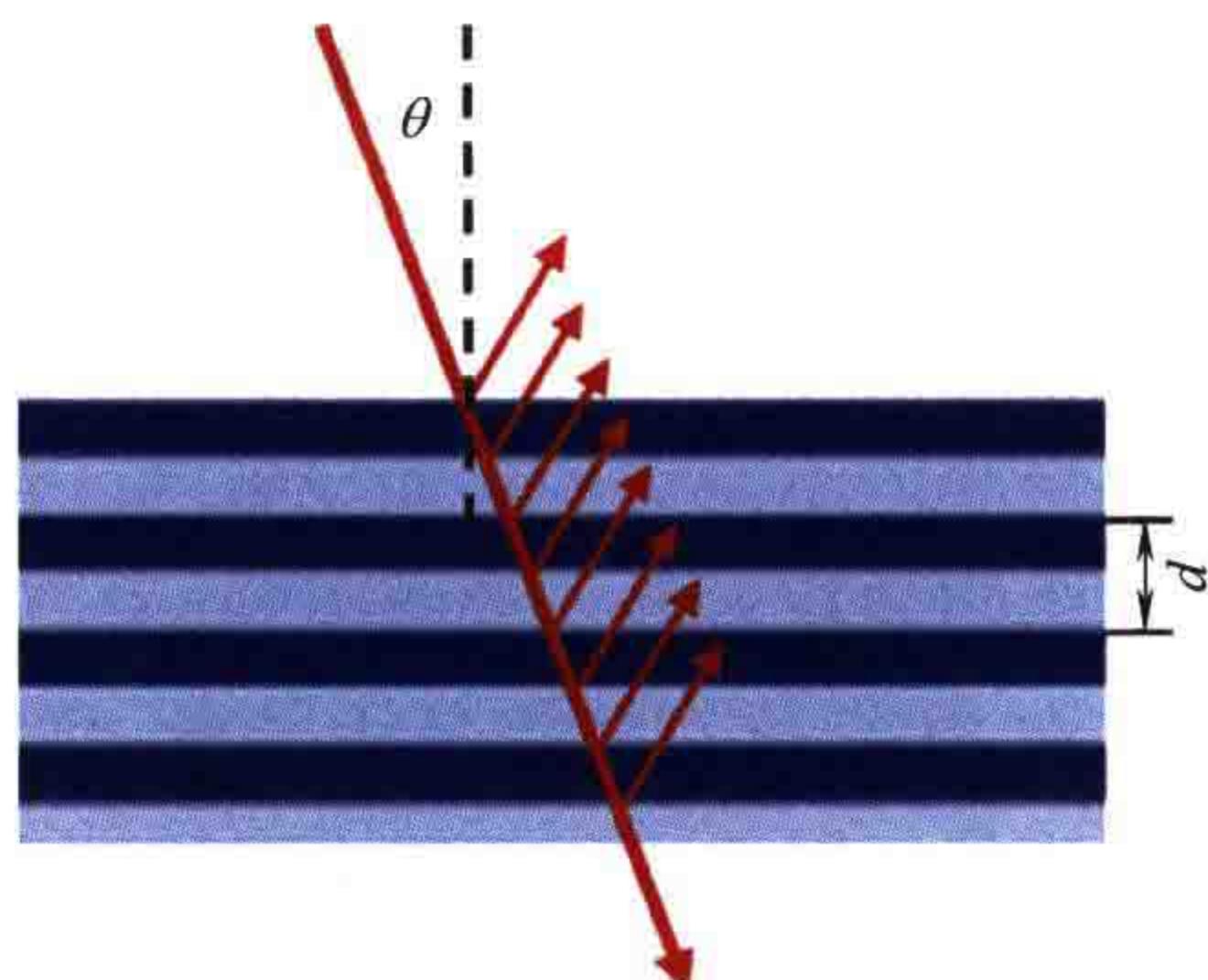


图 6.4 多层膜示意图

些材料之间的折射率对比度很高，而且它们对 EUV 光的吸收相对较小。

可以用传递矩阵法计算 Mo/Si 多层膜的反射率（8.3.3 节对该方法进行了简要说明）。图 6.5 显示了典型 Mo/Si 多层膜的反射率值随波长和入射角的变化曲线。在工作波长 13.5nm 处、 $0^\circ \sim 12^\circ$ 入射角范围内，理论反射率可达 70% 左右。图 6.5 中，虚线和右图无阴影区域表示标称波长、入射角，以及与数值孔径 0.33 相对应的入射角范围。

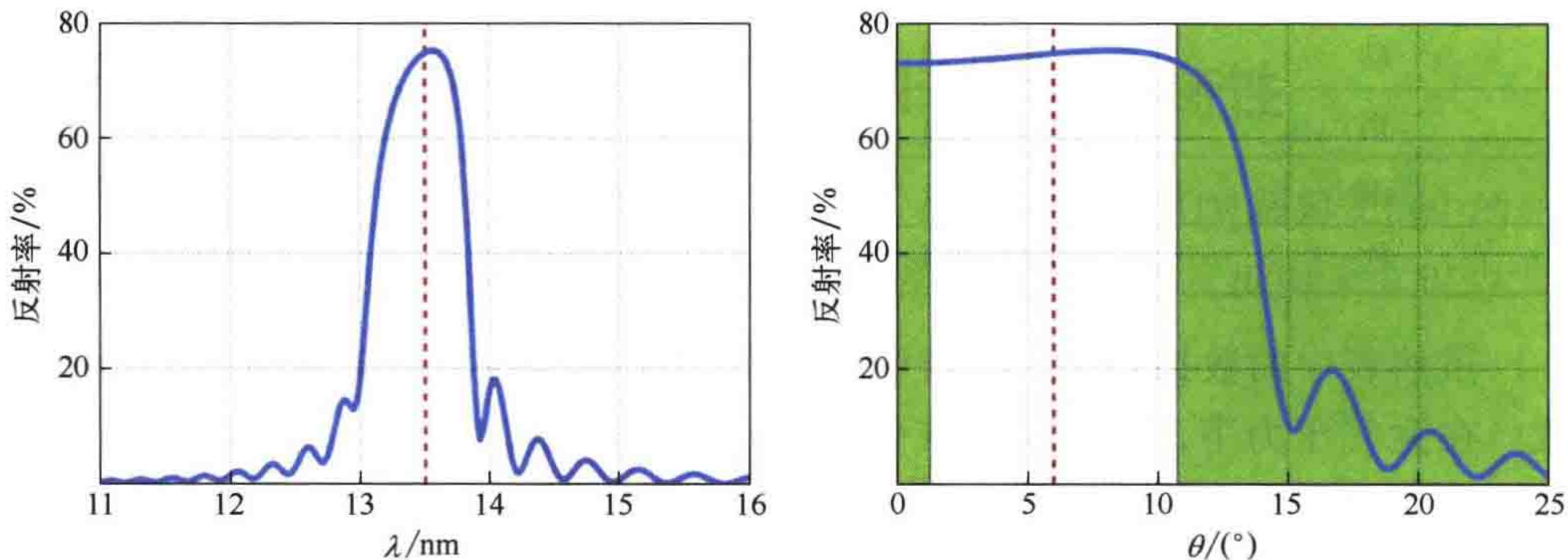


图 6.5 Mo/Si EUV 多层膜系统的反射率仿真值随波长（左）以及入射角 θ （右）的变化。

多层膜参数：40 对双层膜，Mo 的厚度为 3nm（复折射率 $n=0.91943+0.00663i$ ），Si 的厚度为 4nm（复折射率 $n=0.99875+0.00183i$ ）。垂直的虚线表示工作波长 13.5nm 以及典型的 6° 入射角。

右图中无颜色填充区域表示对应数值孔径 0.33 的入射角范围

实验可达到的反射率会略低于理论预测值。这种差异是由薄膜厚度的微小变化和多层膜内不完美的界面导致的。钼和硅之间的扩散产生了混合层，降低了钼层和硅层之间的反射率。常使用 Mo_2O 等阻挡层来减弱层间扩散效应。Aquila 等人^[20] 论证了在 EUV 多层膜设计中考虑“膜层间会发生混合”的必要性。顶层的氧化会进一步降低反射率。可采用金属钉组成的顶盖层保护多层膜不被氧化。

图 6.5 中的反射率数据表明，EUV 系统中每对反射镜导致的光能损失都会超过 50%，所以 EUV 系统中的反射镜数量不能太多。EUV 光源发出的光经过多层膜多次反射后光谱会变窄，减少了带外辐射（见 6.4 节的讨论）。

实验上可达到的反射率还受反射镜表面散射造成的光能损失的影响。即使粗糙度只有几埃（ \AA ， $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ ）量级，光的散射也会导致明显的能量损失。极紫外光刻成像系统反射镜的面形误差指标为 0.2nm。

尽管存在这些技术挑战，人们已利用磁控溅射技术成功制备了适用于 EUV 成像系统的 Mo/Si 多层膜反射镜^[21]。采用特殊的抛光和面形表征技术保证平面度达到面形误差指标^[22]。

6.3 掩模

吸收层位于 Mo/Si 多层膜上面，主要作用是产生 EUV 光刻掩模图形。入射角为 6° 的倾斜照明将反射光与入射光分开。多层膜反射率随入射角和斜射照明的变化而变化，导致了几种 EUV 光刻特有的成像现象。本节和下一节将讨论这些现象。

图 6.6 是典型 EUV 光刻掩模的横截面图。在热膨胀性超低的基底上沉积了 40 对 Mo/Si 双层膜。为了在一定入射角范围内获得高反射率，需要对 Mo 和 Si 层的厚度进行优化。钉顶盖层的厚度为几纳米，可使多层膜免受氧化以及其他物理和化学作用的影响。

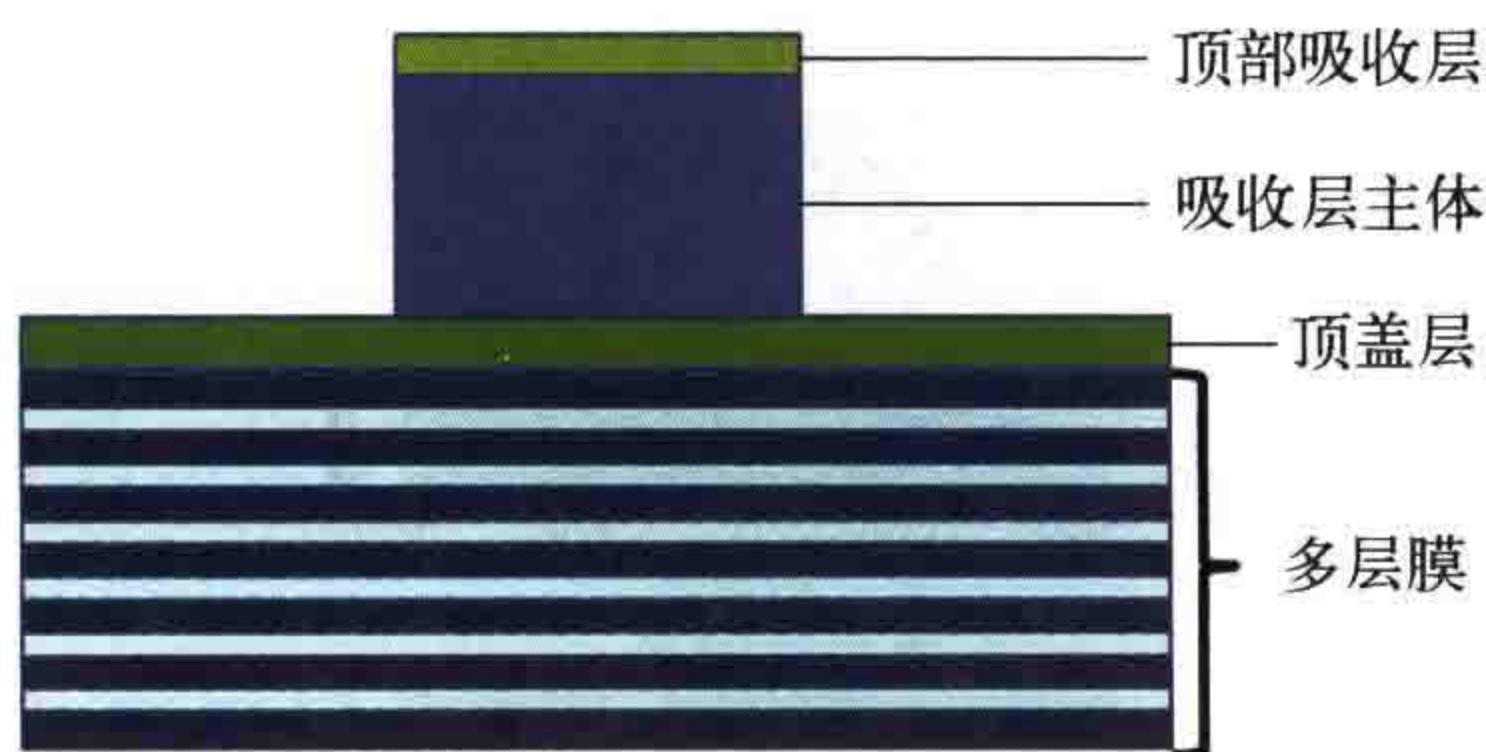


图 6.6 典型 EUV 掩模的横截面图。吸收层为单层膜或者双层膜层。反射式 Mo/Si 多层膜由 40 对双层膜组成。图中仅仅显示了一部分膜层

吸收层的作用是产生不透光的图形，通常由一种或多种材料组成。顶部吸收层的化学成分取决于吸收层沉积工艺，以及吸收层与局部环境的相互作用。吸收层膜层需要能够抑制极紫外光的反射，并便于利用深紫外光对掩模进行计量和检测。为有效地吸收光，钽基吸收层（TaBN，见表 6.1）的总厚度至少为 50nm，大约是波长的 4 倍。式 (2.3) 中的基尔霍夫边界条件不能满足 EUV 掩模衍射光仿真的需求。因为该条件假设掩模为无限薄的薄层。为了理解和量化 EUV 掩模特有的成像效应，须采用严格电磁场仿真方法（见第 9 章）。

倾斜入射使光的衍射和成像特性与入射光方向密切相关。图 6.7 为线空图形的两种典型方向。照明光在 yz 平面上发生倾斜，与 z 轴的夹角为 θ 。 x 方向水平线条图形会产生不对称的阴影效应。照射到 y 负方向吸收层正面的光比在 y 正方向吸收层背面的光少。 y 向垂直线条图形吸收层两侧的光强相同。

图 6.8 为采用严格电磁场方法仿真的水平线条和垂直线条的近场强度。为了突显上述效应，入射光和反射光的强度分别绘制在图的左列和中列。右列为掩模附近 EUV 光的总强度。吸收层区域用虚线表示。多层膜顶部在 $z=0$ 处。

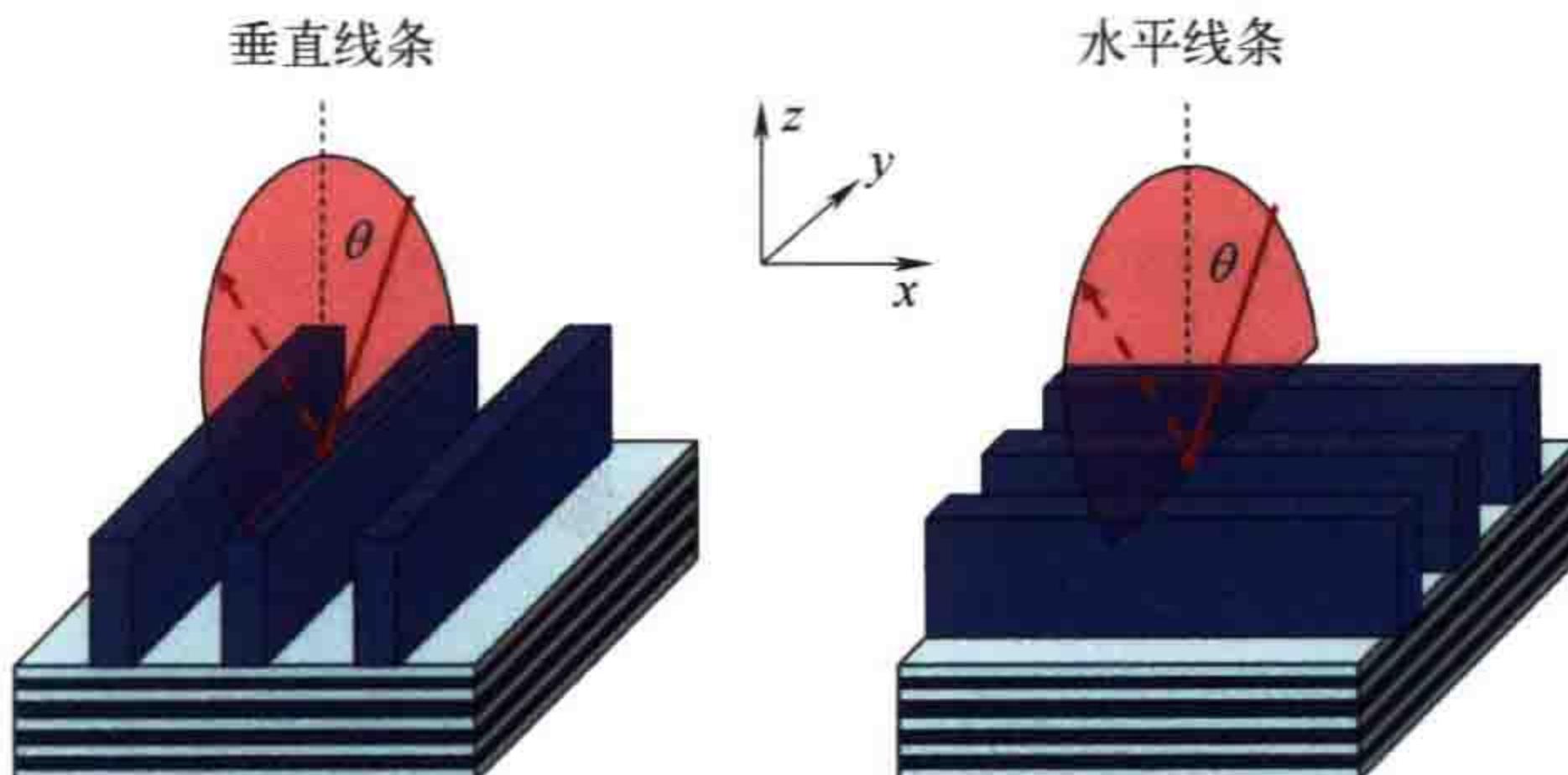


图 6.7 EUV 掩模水平线条(左)和垂直线条(右)示意图。为了更好的视觉效果,省略了顶部吸收层和顶盖层。转载自参考文献 [23]

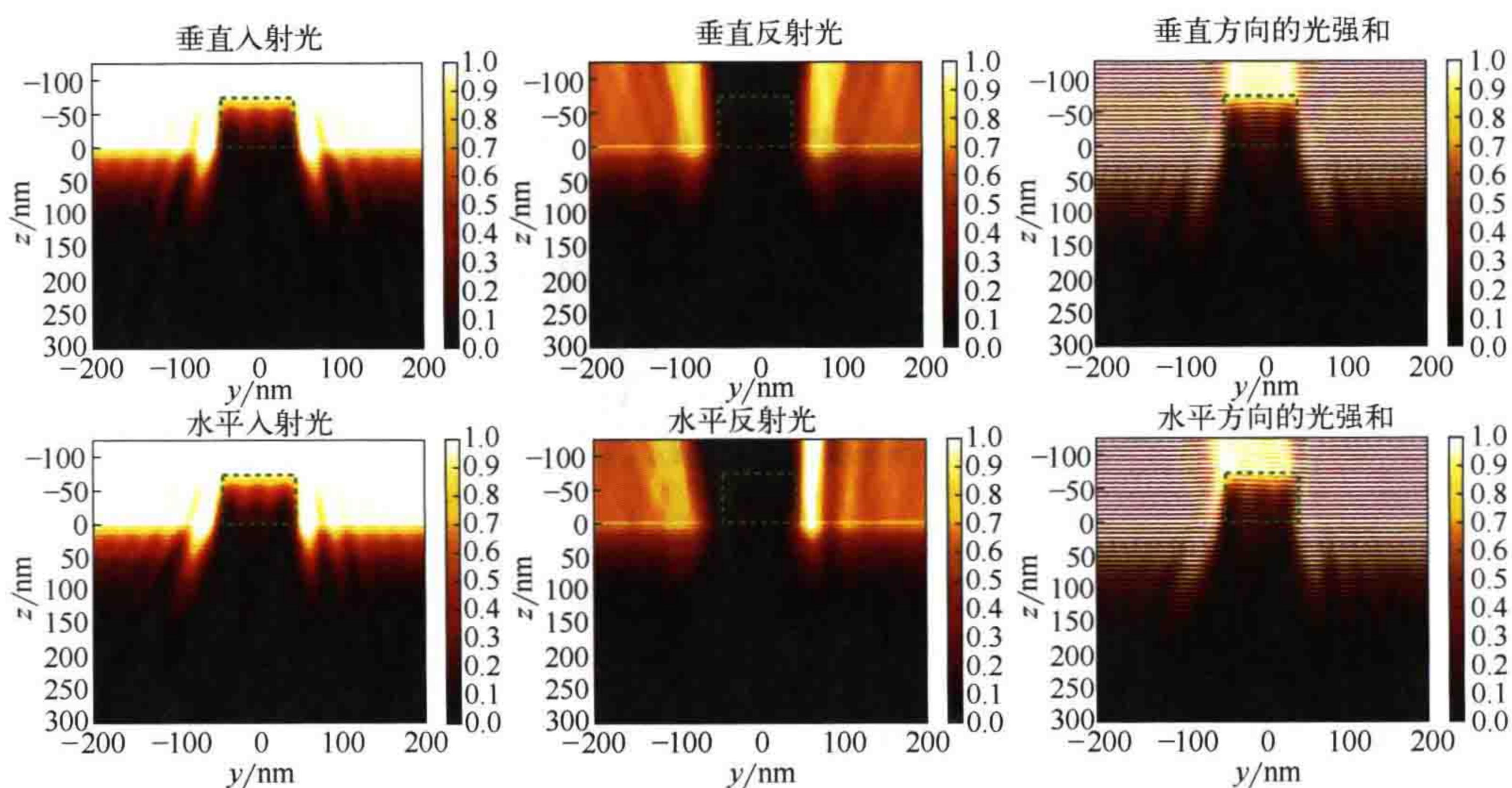


图 6.8 垂直线条(第一行)和水平线条(第二行)EUV 掩模近场的严格仿真结果。向下传播的人射光(左)、向上传播的反射光(中)以及两者的叠加(右)。设置: 波长 13.5nm, 入射角 $\theta=6^\circ$, 电场矢量平行于线条, 宽 88nm、周期 400nm 的吸收层线条(由 14nm TaBO 和 60nm TaBN 组成的双层膜)

正如预期的一样, 入射光在吸收层内衰减。无吸收层区域的人射光穿透多层膜。光在吸收层边缘的衍射引起了多层膜内光强的横向调制。垂直线和水平线的人射光强度差异很小。当反射光第二次照射到吸收层图形时, 差异变得明显。水平线条的反射光呈现出明显的不对称性。 y 正方向上, 吸收层亮侧的光强远大于暗侧阴影内的光强。从反射光近场光强中可以观察出反射发生在多层膜内部, 而不是多层膜顶部。EUV 光在多层膜内传播会引入相位效应, 影响成像。由于入射光与反射光之间的干涉, 图右侧的总光场中存在明显的驻波。

图 6.9 为吸收层正上方, 即图 6.8 中 $z=-75\text{nm}$ 处, 反射光的强度(反射率)和相位图。不对称照明条件下水平线条会产生阴影, 即吸收层左侧的光强较低。多层膜基底反射光和吸收层右侧壁反射光叠加后产生了吸收层右侧的强度峰值。

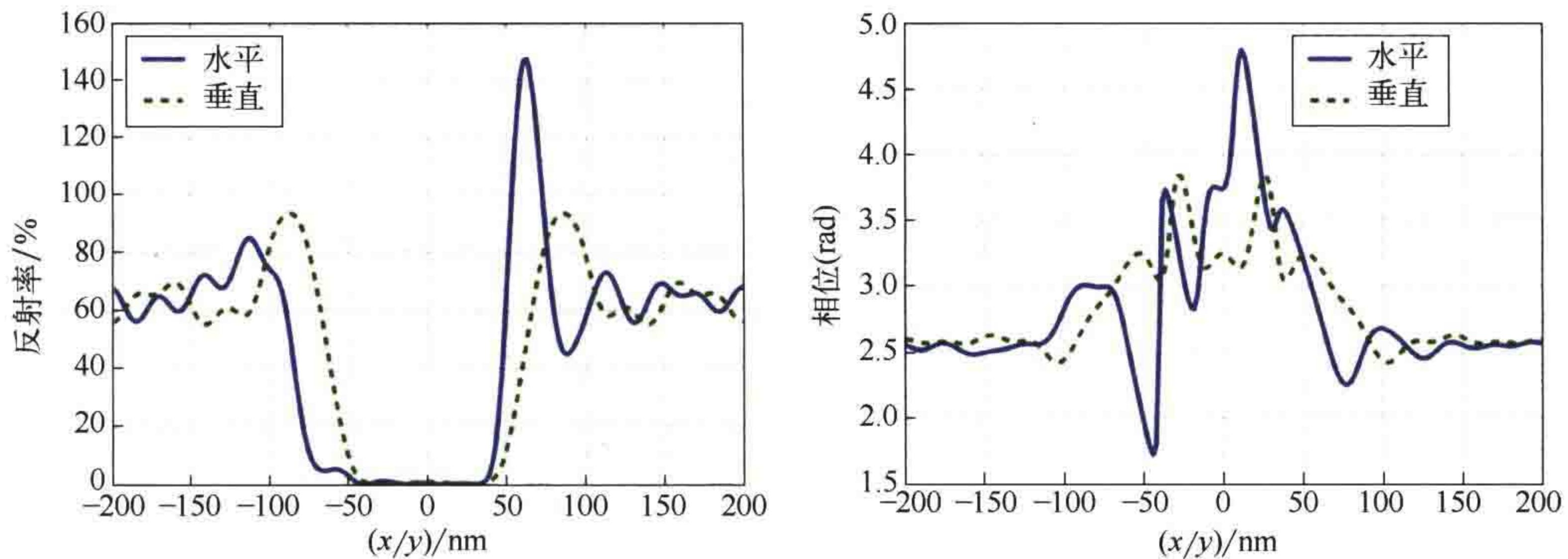


图 6.9 严格仿真方法计算的吸收层膜层反射光的强度（左）与相位（右）。

所有参数与图 6.8 中所示的参数相同

从图 6.9 右侧的相位图中可以看到 EUV 掩模对光的反射的另一个特点。对于水平和垂直线条，在 $x = -44\text{nm}$ 和 $x = 44\text{nm}$ 之间的吸收层线条附近，反射光的相位变化强烈。由于吸收层内部的反射率很小，线条中心的相位变化对成像并不重要。然而，吸收层边缘附近的相位变化会产生几种类似像差的成像效应。下一节将讨论其带来的一些成像效果。

图 6.10 从另一个角度展示了光经过 EUV 掩模的衍射过程^[24]。图中给出了各个衍射级穿过掩模传播的光路。吸收层和多层膜反射镜都被简化为无限薄的光学元件。通过设定吸收层和多层膜之间的距离，将多层膜简化为位于真实多层膜内的一个反射面。

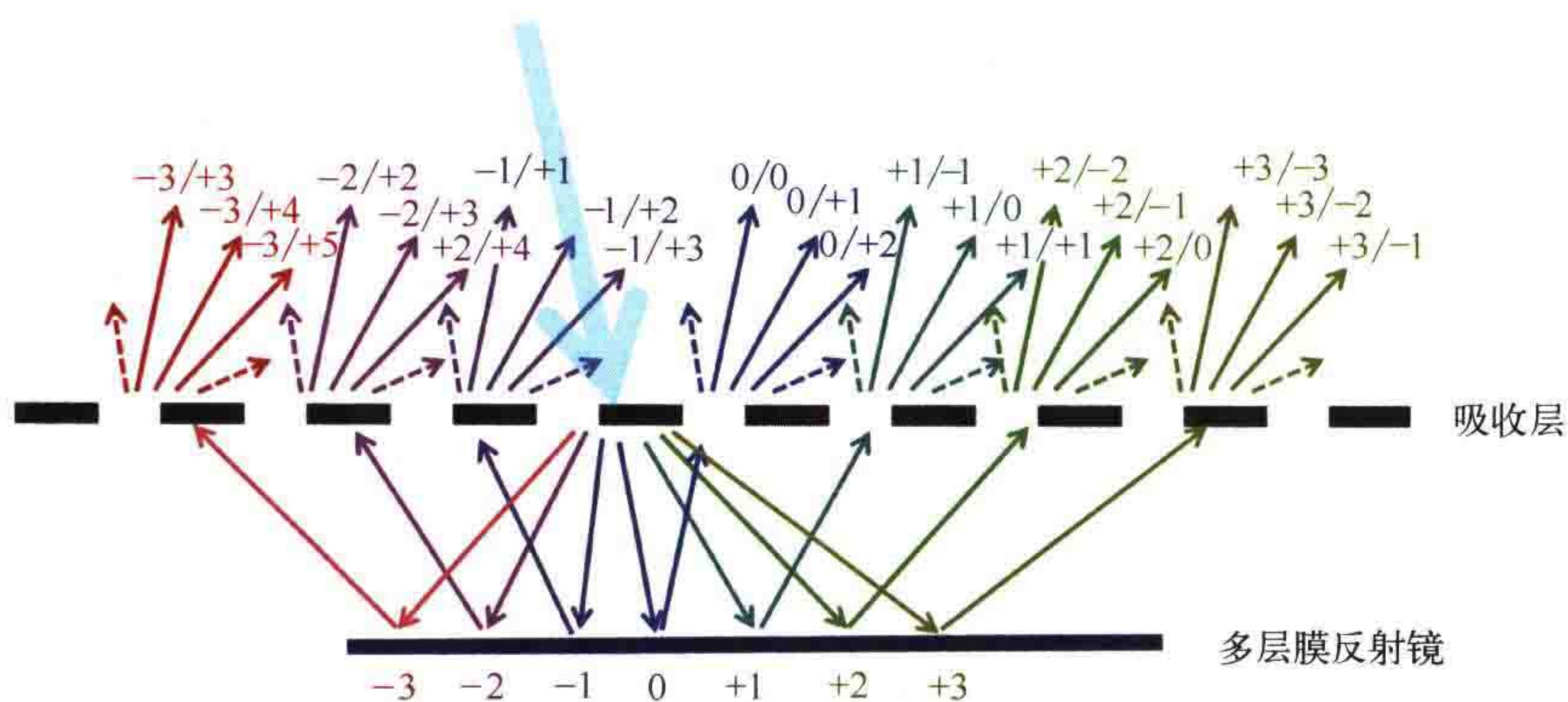


图 6.10 EUV 掩模对光的二次衍射。向下的粗箭头表示入射光。其他箭头表示吸收层（粗虚线）反射光与多层膜反射镜（粗实线）反射光。更多细节请见参考文献 [24]。

转载自参考文献 [24]

光源发出的光向下传播，照射到吸收层后发生衍射，形成离散的衍射级次。衍射光照射到多层膜上，所有级次都被反射回吸收层。向上传播的级次再一次照射到

吸收层发生衍射。吸收层顶部向上传播的光包含两套衍射级，代表光的两次衍射。 $-3/+3$ 、 $-2/+2$ 、 $-1/+1$ 、 $0/0$ 、 $+1/-1$ …级衍射光相干叠加产生了光瞳内的0级衍射级。这些衍射级的强度不同，在吸收层和（多层）反射镜之间传播时产生的相位延迟也不同。投影物镜光瞳内的其他衍射级次也类似。二次衍射以及吸收层和多层膜有效反射面之间传播距离和相位延迟的不同导致 EUV 光刻具有一些 DUV 光刻所没有的特殊成像效应。

9.2.4 节深入讨论了 EUV 光刻中的掩模形貌效应（3D 掩模效应）及其缓解策略。其中，使吸收层尽可能薄是这些缓解策略之一。目前使用的 TaBN 吸收层的厚度为 $55 \sim 65\text{nm}$ ，反射率超过 1%。这种非零反射率不仅会影响单个图形的成像性能，还会引起 EUV 光刻特有的黑边效应。为了将相邻曝光场分开，掩模上会刻有不透光线条。受来自不透光线条的光的影响产生了黑边效应。Natalia Davydova 等人^[25, 26]详细讨论了黑边效应对 EUV 成像的影响以及可能的解决方案。这些方案包括 OPC，以及去除黑边所在位置的吸收层和多层膜的方法等。

由于分辨率很高，EUV 光刻对缺陷和颗粒非常敏感。6.6 节介绍了一些掩模缺陷方面的内容。本节剩余部分简要讨论了 EUV 掩模保护膜。图 6.11 为一个带有薄保护膜的标准掩模膜层。EUV 保护膜是一种薄膜，用于保护掩模免受颗粒的影响^[27, 28]。光学光刻中的保护膜已经非常成熟^[29-31]。由于厚度非常小，导致 EUV 保护膜面临一些特殊挑战。所有材料对 EUV 光都会强吸收，而且 EUV 光传播过程中需要穿过保护膜两次，会导致明显的光强损失，降低了产率。

图 6.11 不是按实际尺寸比例绘制的。当前 EUV 掩模保护膜的厚度约为 50nm 。保护膜的典型隔离距离（SoD），即保护膜与吸收层之间的距离为几毫米。这确保了落在掩模上的颗粒不会靠近位于成像系统物平面的吸收层。这些颗粒是离焦的，不会（清晰地）成像到像面上的光刻胶上。

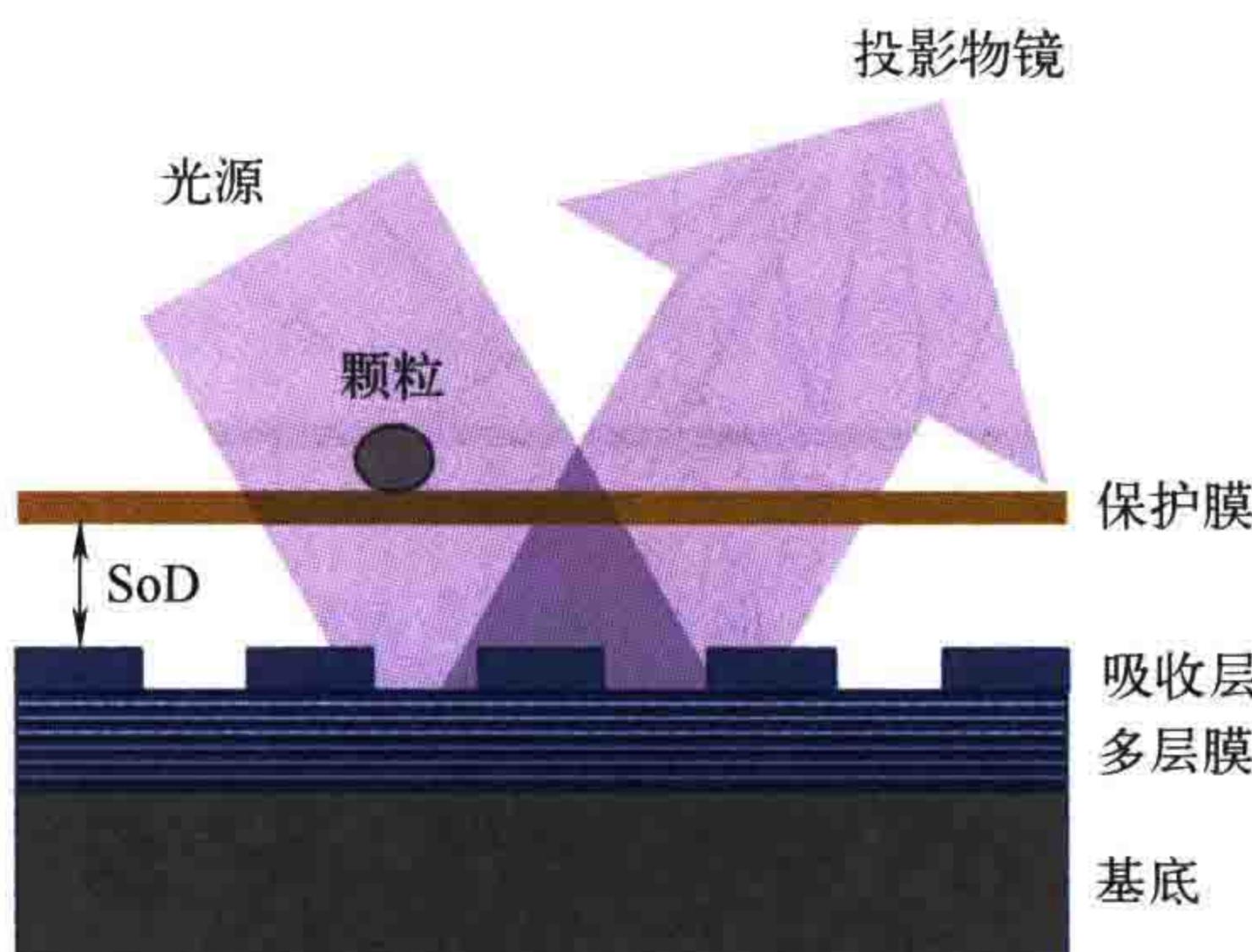


图 6.11 带有保护膜的 EUV 掩模示意图。改编自参考文献 [28]

只有直径大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒才有可能会影响吸收层图形的成像。利用仿真和实验确定临界颗粒尺寸，并防止直径达到临界尺寸的颗粒出现在成像系统中（参见文献 [28, 32] 和这些文献中的参考文献）。

6.4 光刻机与成像

EUV 光刻机中广泛应用的多层膜反射镜会影响投影物镜和照明光学系统的设计^[34, 35]。多层膜反射率限制了系统中反射镜的数量。第一次 EUV 曝光采用了带有两镜 Schwarzschild (施瓦西) 型投影物镜的步进曝光装置^[36, 37]。这些步进曝光装置和类似的小视场曝光装置被用作学习工具，辅助开发 EUV 投影技术和测试各种新技术和新方法。最先进 EUV 光刻机的投影物镜采用六面反射镜（见图 6.1）。通过联合优化和精修非球面镜面形和多层膜，可最大限度地减小光瞳内光的振幅和相位误差^[35]。光栅横向剪切干涉仪^[38] 和相移点衍射干涉仪^[39] 常被用于表征反射镜和投影物镜系统的特性。

EUV 光刻机的照明系统采用科勒型设计，带有蝇眼积分器单元^[3, 40]。这些积分器采用面镜阵列将来自中继焦点的准直光束分成许多成像通道。具有各自光瞳面的成像通道通过聚光镜叠加在一起，以给定的入射角均匀照明掩模面，获得所需的频谱^[41]。由于采用了多个成像通道，照明系统光瞳由数百个光斑组成^[42]。通过灵活地控制通道中的光，可以在各种照明模式之间无损切换^[3]。

如前一节所述，EUV 成像系统采用了离轴照明。标称入射角为穿过孔径光阑中心的主光线与掩模表面法向量之间的角度（见图 6.14）。当前 EUV 成像系统的物方主光线角 (CRAO, 入射角) 为 6° 。EUV 照明系统的光瞳形状以该主光线角为中心。主光线角和掩模图形相对于主光线的方向对成像都很重要。

可采用矢量傅里叶光学方法对 EUV 投影系统的成像进行建模，如第 2 章和第 8 章所述。式 (8.15) 中的琼斯瞳孔 $\hat{\mathbf{J}}(\dots)$ 可以用于折射式与反射式成像系统。如 6.3 节所述，必须通过严格电磁方法计算掩模远场衍射光 \mathbf{E}^{ff} 。数值孔径大于 0.2 时，EUV 光刻成像建模就不能再使用霍普金斯方法（见第 9 章）。

图 6.12 为水平和垂直线空图形的成像仿真结果。左图为空间像截面图，右图为相应的工艺窗口。不对称照明导致水平线的空间像向左小幅偏移。设定空间像阈值在 $0.1 \sim 0.3$ 之间，提取线宽或 CD，可见水平线的空间像略宽于垂直线。这些与方向有关的成像效应已经在 EUV 光刻的早期研究中报道^[43]。可通过适当的光学邻近效应修正 (OPC) 和 / 或移动位于成像系统物平面的掩模，来校正与方向有关的全局 CD 差异和成像位置差异^[44]。研究人员已提出了几种几何阴影模型来预测图形 CD 和位置对方向的依赖性^[45, 46]。但是这些简化模型无法预测最先进 EUV 投影系

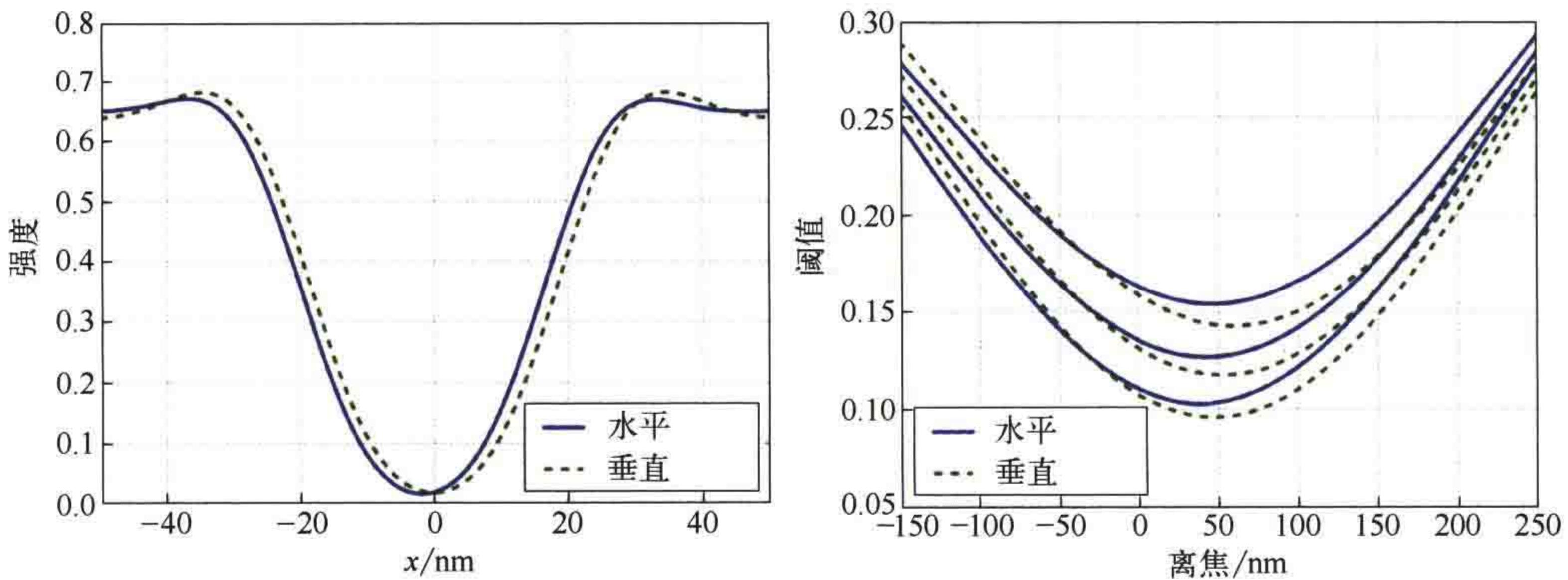


图 6.12 水平和垂直线条的空间像（左）和工艺窗口（右）。线宽 22nm，周期 100nm（硅片面），数值孔径为 0.33，圆形照明 $\sigma=0.7$ ，其他参数同图 6.8

统的成像特性。

仔细观察图 6.12 可以发现工艺窗口存在一些不对称，且相对于最佳焦面发生了位置偏移。这可归因于掩模导致的相位效应。该效应已在图 6.9 所示的近场中观察到。参考文献 [47] 和第 9 章对这一现象进行了详细讨论。简单的 OPC 不能补偿这种与掩模图形和焦面有关的成像缺陷。

图 6.13 展示了 EUV 光刻成像的另一个典型特征：远心误差。远心误差可归因于 EUV 光在掩模上的倾斜入射。空间像横截面相对于焦面位置的等高线图表明在 $\pm 150\text{nm}$ 离焦量之间线条的位置发生了线性偏移。为突出上述效果，图示的仿真中选择了特定的模型参数并进行了图像缩放。在其他掩模图形和参数设置情况下，也可以观察到图形位置相对于最佳焦面位置的线性变化。远心误差或图形位置相对于离焦的曲线斜率随照明参数和掩模图形周期的变化而变化。

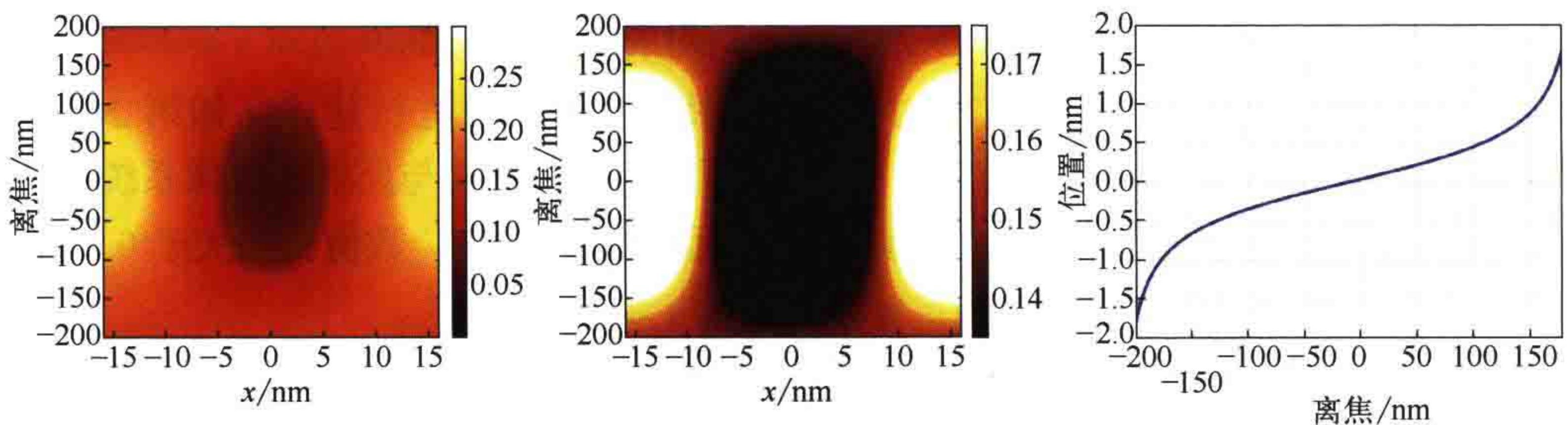


图 6.13 EUV 成像的非远心效应。两个不同轮廓范围的仿真空间像随焦面的变化（左图和中图）。从中提取的图形位置随离焦的变化（右图）。设置：水平线，线宽 16nm，周期 32nm（硅片面），数值孔径 0.33，环形照明 $\sigma_{in}/\sigma_{out}=0.4/0.7$ ，主入射角 8° ，80nm 厚 TaBN 吸收层，其他参数同图 6.8

主光线角随曝光狭缝中像的位置而变化，如图 6.14 所示。这种照明方向与曝光狭缝内波像差的变化引起了与狭缝有关的成像问题和可印性问题，需

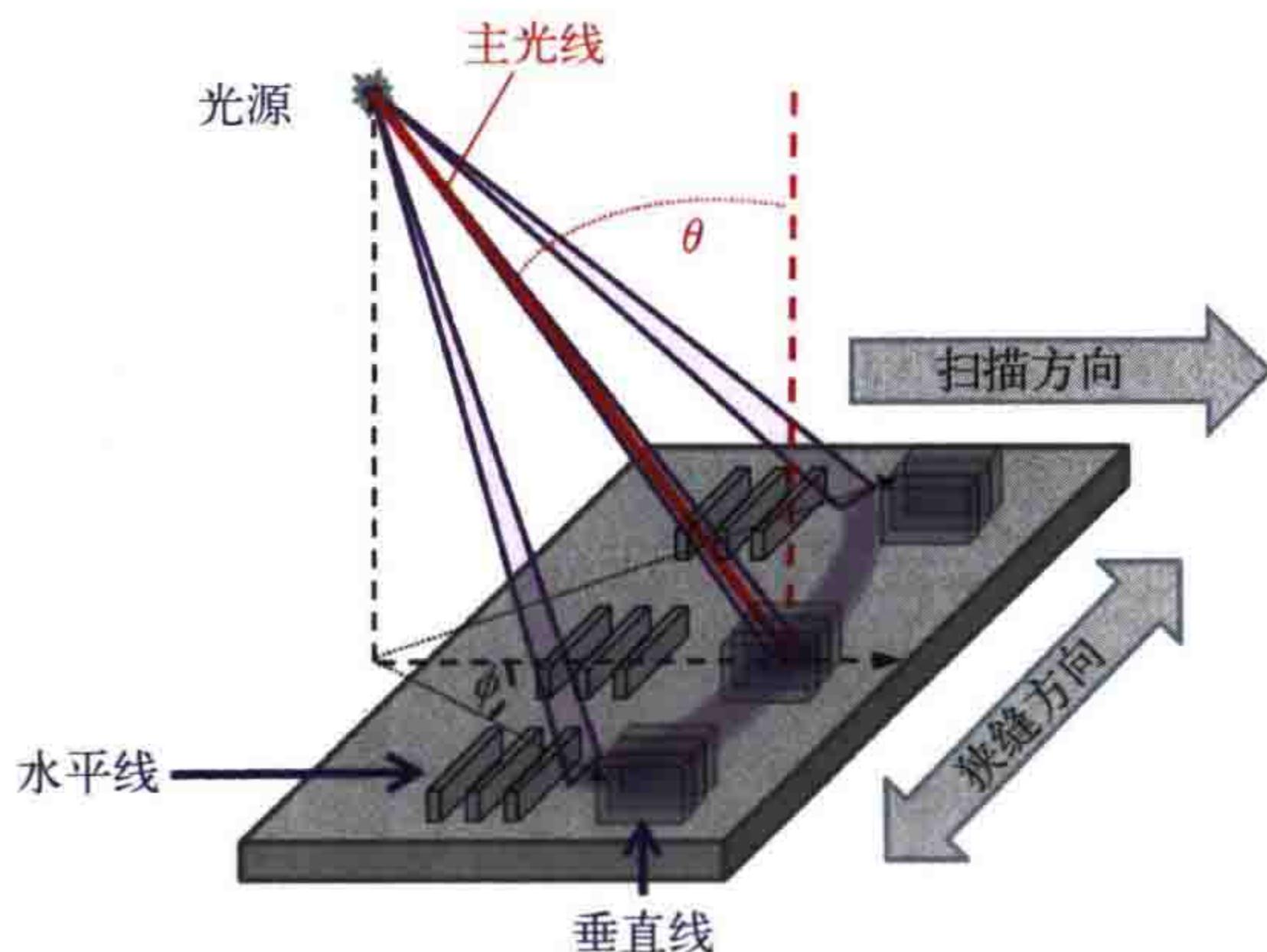


图 6.14 光刻机扫描狭缝内主光线入射角和图形方向的变化示意图。改编自参考文献 [49]

要采用 OPC 予以解决^[48-50]。事实上，照明系统光瞳不同区域对应的照明方向也不同。9.2.4 节将讨论由此导致的 EUV 光刻成像对比度衰减和掩模形貌效应（3D 掩模效应）。

EUV 光刻的曝光波长很短，对表面平面度要求很高，使得 EUV 投影成像系统对随机散射光或杂散光非常敏感。光学元件表面粗糙度导致的杂散光与波长的平方成反比。在表面粗糙度相同的情况下，EUV 投影成像系统中的杂散光总量是 ArF 光刻的 200 倍以上^[51]。

已开发了专用的抛光技术，可将 EUV 反射镜的表面粗糙度降低至 50pm 均方根误差（RMS）。如果将反射镜放大到与美国同样大，粗糙度缺陷不能超过 0.4mm^[52]。

对 EUV 掩模进行 OPC 必须考虑反射镜表面的散射光。粗糙度造成的影响取决于面形变化的空间频率。低频粗糙度会导致投影物镜产生波像差（参见第 8 章中的相关讨论）。

中频粗糙度会产生杂散光（随机散射光）。EUV 系统中的杂散光可以延伸到几毫米大小的掩模区域。掩模较暗或较亮区域的杂散光总量不同，会引起局部杂散光波动，进而导致特征尺寸变化。参考文献 [53] 和 8.2.2 节中介绍的功率谱密度（PSD）函数可用于仿真杂散光对成像的影响。图 6.15 为几种考虑了不同水平杂散光的掩模设计。

高频粗糙度会影响反射镜的反射率。常采用专用的系统规格参数定义杂散光的频率成分^[3]。

EUV 光刻另一个特有的成像效应是带外（OOB）辐射。OOB 辐射是指曝光所需带宽之外的辐射。EUV 光源发出的光是宽带光，波长范围覆盖从软 X 射线到 DUV 之间的所有波段。虽然 Mo/Si 多层膜反射镜可从 EUV 光谱中滤出一个很窄的带宽（即中心波长为 13.5nm EUV 光的半峰全宽），但它也会反射 DUV（和可见光）波段的光。由于投影物镜同时也是 DUV 波长的成像光学系统，所以不能把 OOB 辐射视

为均匀的背景成分或直流杂散光进行处理^[55, 56]。图 6.16 为典型的 OOB 效应数据。OOB 辐射对光刻的影响还取决于光刻胶的灵敏度。

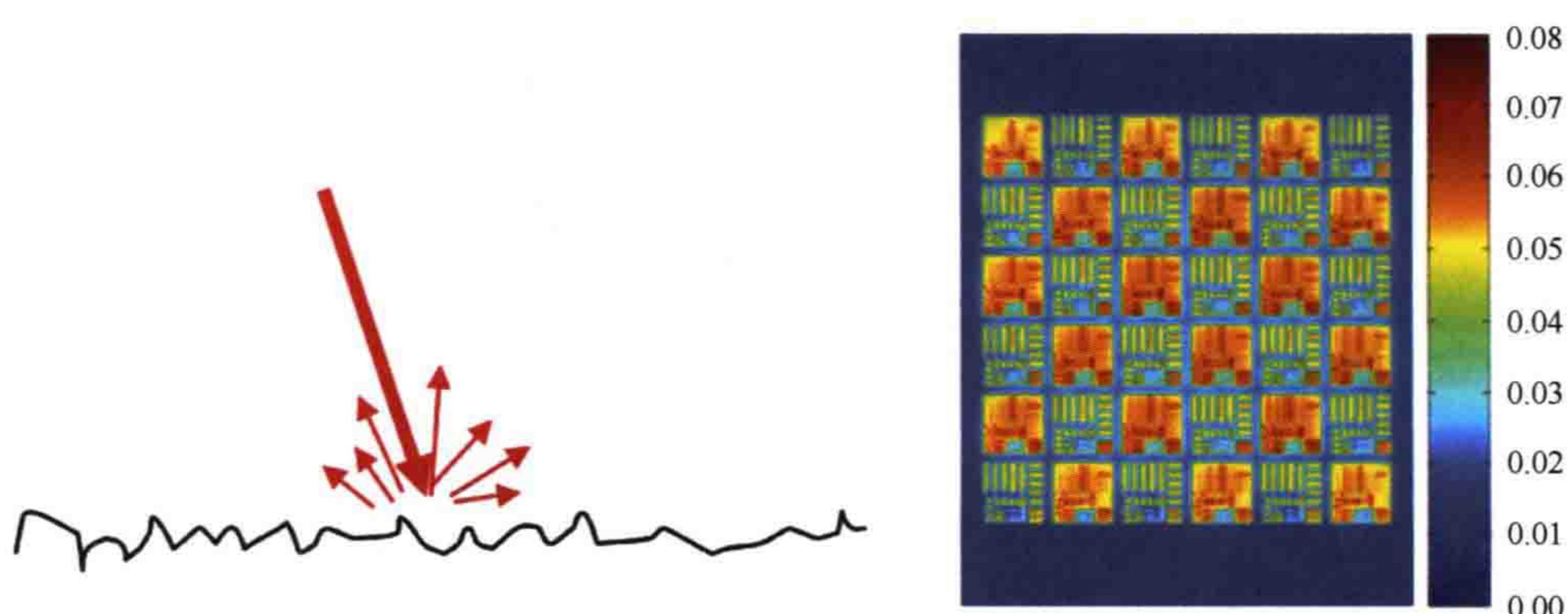


图 6.15 杂散光效应。粗糙表面（左）与对设计进行修正后的掩模（右）引起的散射光示意图。
含有两种杂散光水平的子曝光场。转载自参考文献 [54]

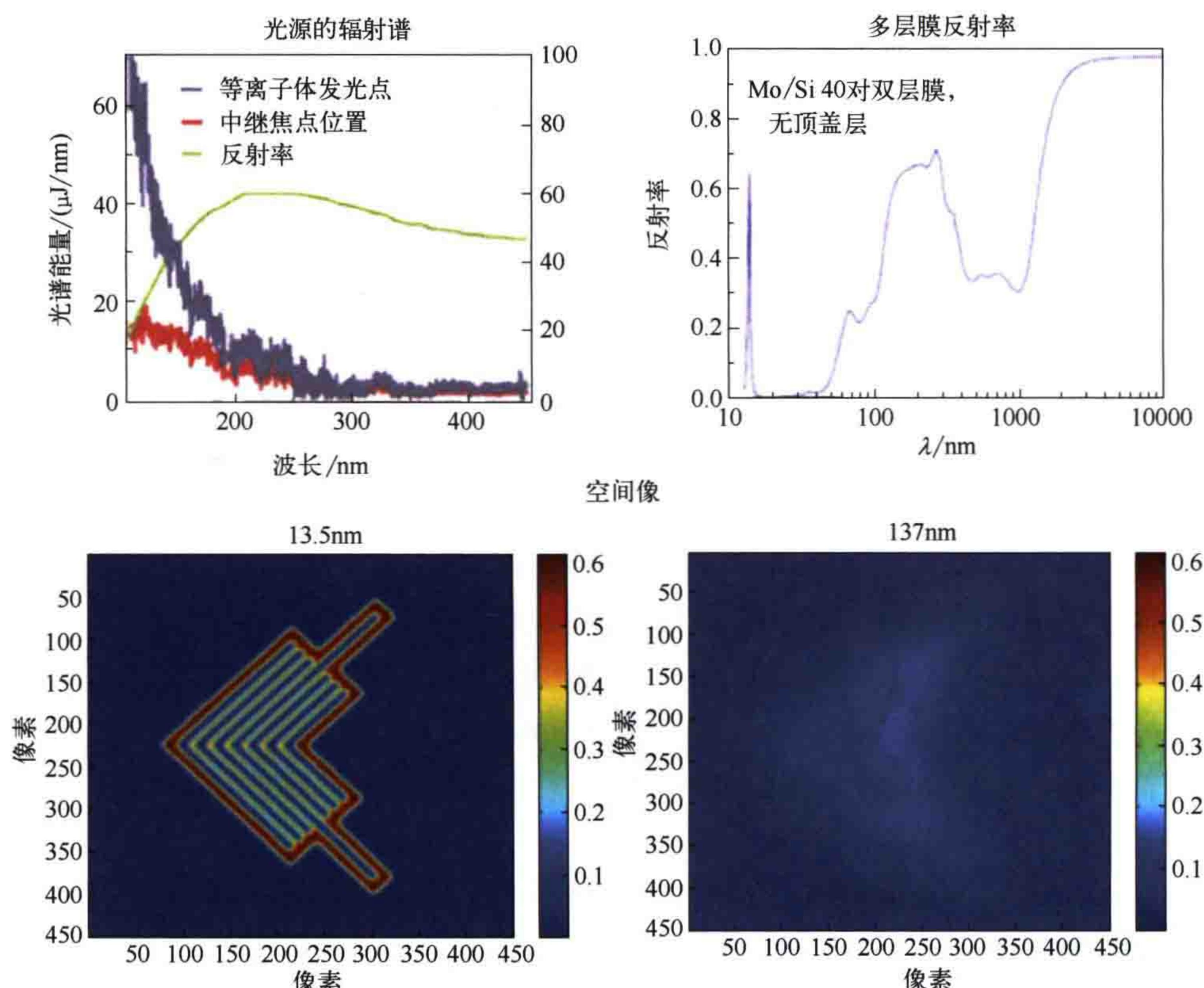


图 6.16 EUV 光刻的带外效应。EUV 光源的典型辐射谱（左上），多层膜从 EUV 到红外波段的反射率（右上），EUV 光照明下的仿真空间像（左下），以及 137nm 波长照明下的空间像（右下）。注意像强度之间的明显差异。转载自参考文献 [55]

6.5 光刻胶

EUV 光刻工艺采用“经典”化学放大光刻胶和几种备选材料来应对 EUV 光刻的特殊挑战。采用标准化学放大光刻胶的好处是可以直接应用现有材料或工艺，或者仅需对现有材料和工艺做微小修改。但是，光源带外 EUV 辐射引起曝光、真空工作环境，以及光刻胶图形的深宽比很高等问题给高能 EUV 辐射曝光带来了许多挑战，使得新材料和新工艺成为研究热点。需要在分辨率、线边粗糙度 (LER) 和灵敏度之间进行平衡。这是 EUV 光刻胶和工艺面临的最严重挑战（见第 10 章）。

EUV 光子的能量约为 92eV，超过了光刻胶材料的电离势。因此，EUV 光刻胶材料的敏化机制与 DUV 光刻的光化学反应本质上不同^[57]。图 6.17 为 EUV 光刻胶的敏化机制示意图。聚合物分子吸收 EUV 光子后发生电离并释放出光电子。具有多余能量的光电子在光刻胶中迁移，与周围分子相互作用失去能量，直到它们在光酸生成剂等局部位点达到热平衡。在这个过程中，它们可以进一步电离，产生激发电子。EUV 光子的能量足以激活 20 ~ 30 个光酸生成剂分子。量子效率（即产生的酸分子数和吸收的 EUV 光子数之间的比值）可以大于 1。此外，光酸的产生地点在距第一个电离点一定距离处，典型距离为 3 ~ 7nm。

EUV 光刻胶层的厚度受焦深 (DoF) 和图形坍塌风险的制约。当清洗液变干后，显影后深宽比（高度 / 宽度）大于 2 的图形往往回坍塌。采用特定的底膜不仅可以提高光刻胶对基底的黏附性，还可以减少图形坍塌^[59]。

EUV 光刻胶的典型厚度为 30 ~ 50nm。这么小的厚度给图形转移带来了更多挑战。标准化学放大光刻胶材料的吸收率太小，无法在这些光刻胶薄层内产生足夠数量的光子^[60]。金属和氟化物光刻胶提高了 EUV 光子的吸收率（见表 6.1 中的数据）。

EUV 光刻中曝光高灵敏度光刻胶材料的 EUV 光子数量很少，这使得 EUV 光刻容易受到光子噪声的影响^[61, 62]。人们已经开发了几种提高 EUV 光刻胶 LER、灵敏度和分辨率的策略（参见 10.4 节和参考文献 [63, 64]）。

由于 EUV 光刻工作在真空环境中，所以对光刻胶材料的放气高度敏感。光刻

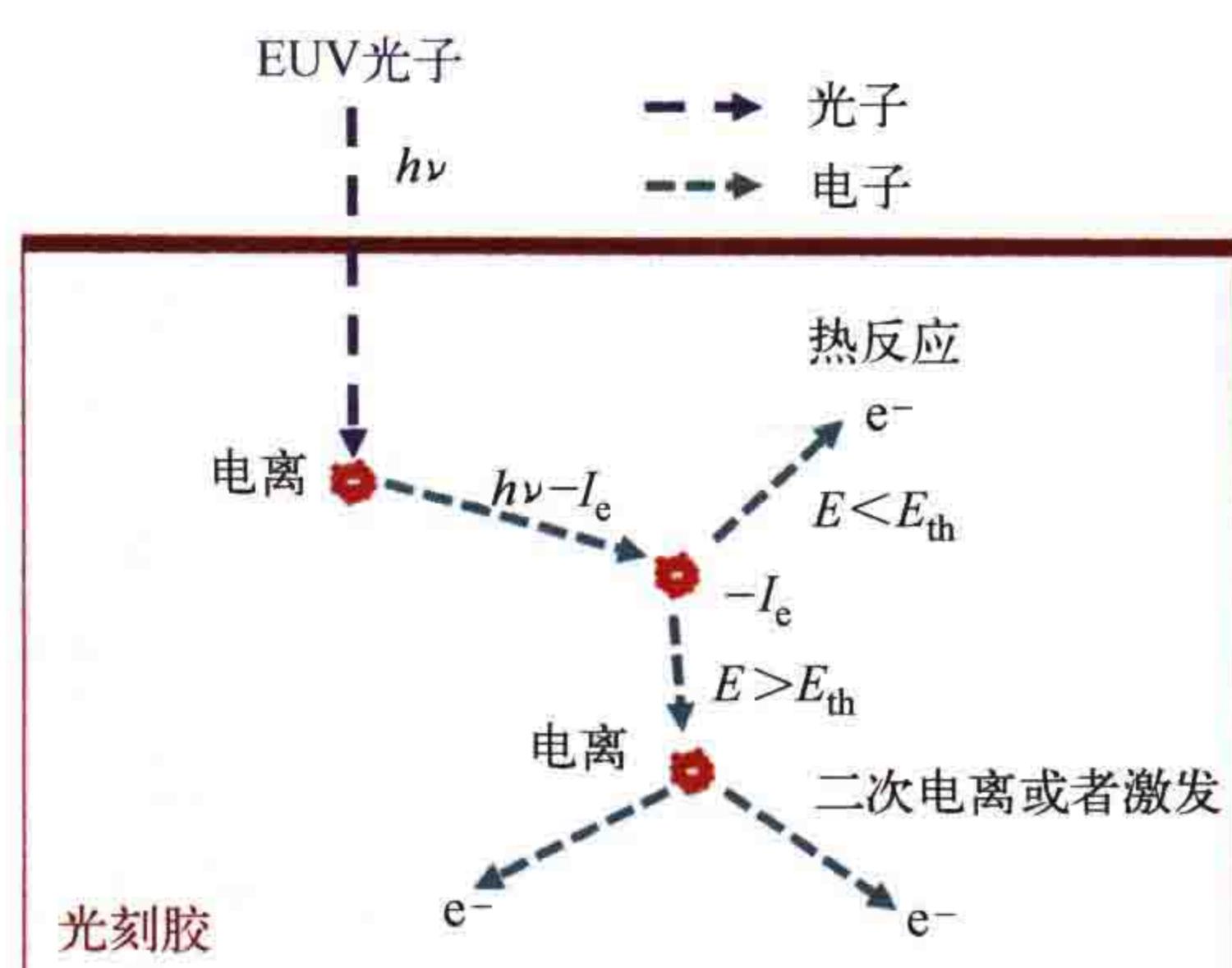


图 6.17 EUV 光刻胶敏化原理示意图。 $h\nu$ ，EUV 光子的能量； e^- ，电子； E ，电子能量； E_{th} ，阈值能量； I_e ，分子电离能。改编自参考文献 [57]

胶曝光过程中释放的某些化学物质可能会损坏 EUV 光学系统中的多层膜反射镜。当暴露在 EUV 光刻机上时，金属光刻胶存在交叉金属污染和金属物质放气的风险^[64]。在这些材料用于光刻机之前，需通过干涉光刻和放气测试对新型材料进行大量的研究^[65, 66]。应用顶盖层可以降低放气风险并减少带外辐射的影响，但是会增加工艺复杂度。

6.6 掩模缺陷

掩模基础设施，特别是掩模缺陷方面的基础设施^[67-71]，是 EUV 光刻面临的另一个挑战。通过引入 EUV 掩模修复技术、EUV 掩模保护膜（参见 6.3 节末尾的讨论和参考文献）、EUV 空间像测量系统（EUV-AIMS）^[73]，以及最近的工作波长含图形掩模缺陷检测系统^[74]，目前已具备处理大部分 EUV 掩模缺陷的能力。这方面内容超出了本书的范围。本节主要讨论多层膜缺陷的特性。

多层膜缺陷无法通过标准的掩模技术进行检测、表征与修复^[75]。图 6.18 为 EUV 掩模多层膜白板内的典型凸起型和凹陷型缺陷。这类缺陷可能是由掩模基底检测过程中遗漏的颗粒或者凹陷引起的，也可能是在检测和多层膜沉积两步之间沉积形成的颗粒或者凹陷引起的。多层膜变形在各个层中的传播取决于多层膜沉积条件^[76]。非线性连续模型可用于描述基底表面颗粒导致的多层膜局部缺陷的生长过程^[77-79]。由于缺少沉积条件信息，常采用高斯形变表征最下层以及最上层形变，中间的形变数据采用线性插值获得。图 6.18 的标题中给出了图中所示缺陷的顶部和底部高度 $h_{\text{top}}/h_{\text{bot}}$ ，以及半高全宽（FWHM） $w_{\text{top}}/w_{\text{bot}}$ 。凹陷型缺陷的高度为负值。

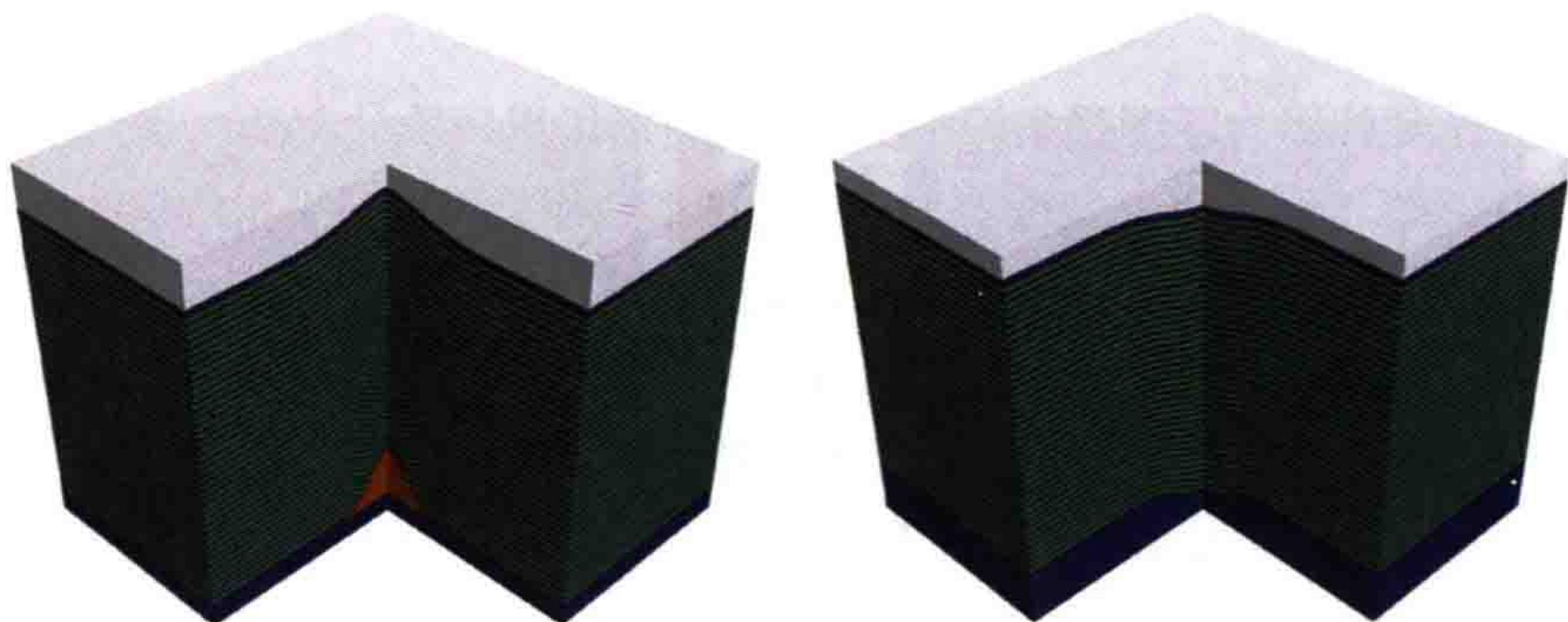


图 6.18 EUV 掩模典型多层膜缺陷结构图。左：凸起型缺陷， $h_{\text{top}}=20\text{nm}$, $w_{\text{top}}=90\text{nm}$, $h_{\text{bot}}=50\text{nm}$, $w_{\text{bot}}=50\text{nm}$ 。右图：凹陷型缺陷， $h_{\text{top}}=-20\text{nm}$, $w_{\text{top}}=90\text{nm}$, $h_{\text{bot}}=-30\text{nm}$, $w_{\text{bot}}=70\text{nm}$

对含缺陷多层膜反射光的正确建模是一项富有挑战性的工作。在单个 CPU 上使用波导法或时域有限差分（FDTD）法对缺陷进行完全严格的仿真，可能需要一

到两天的时间。此外，FDTD 存在数值色散，计算多层膜反射光时会产生明显的误差。参考文献 [80-83] 概述了几种近似建模方法。波导法还可与数据库方法相结合，以高效分析不同吸收层图形条件下多层膜缺陷的可印性^[84]。

多层膜形变导致缺陷附近的反射率降低，反射光相位发生改变。因此，需要将多层膜缺陷看作振幅和相位混合型物体，在焦深方向上成像不对称，即在正负离焦方向上不同。图 6.19 给出了 3 个不同多层膜缺陷在不同离焦位置的像。通常，在没有吸收层的区域多层膜缺陷导致光强下降，表现为暗斑。暗斑的亮暗和形状取决于缺陷的几何形状和所考虑的焦面位置。由于相位变化的符号相反，焦深方向上凸起型和凹陷型缺陷的成像清晰度变化方向相反。

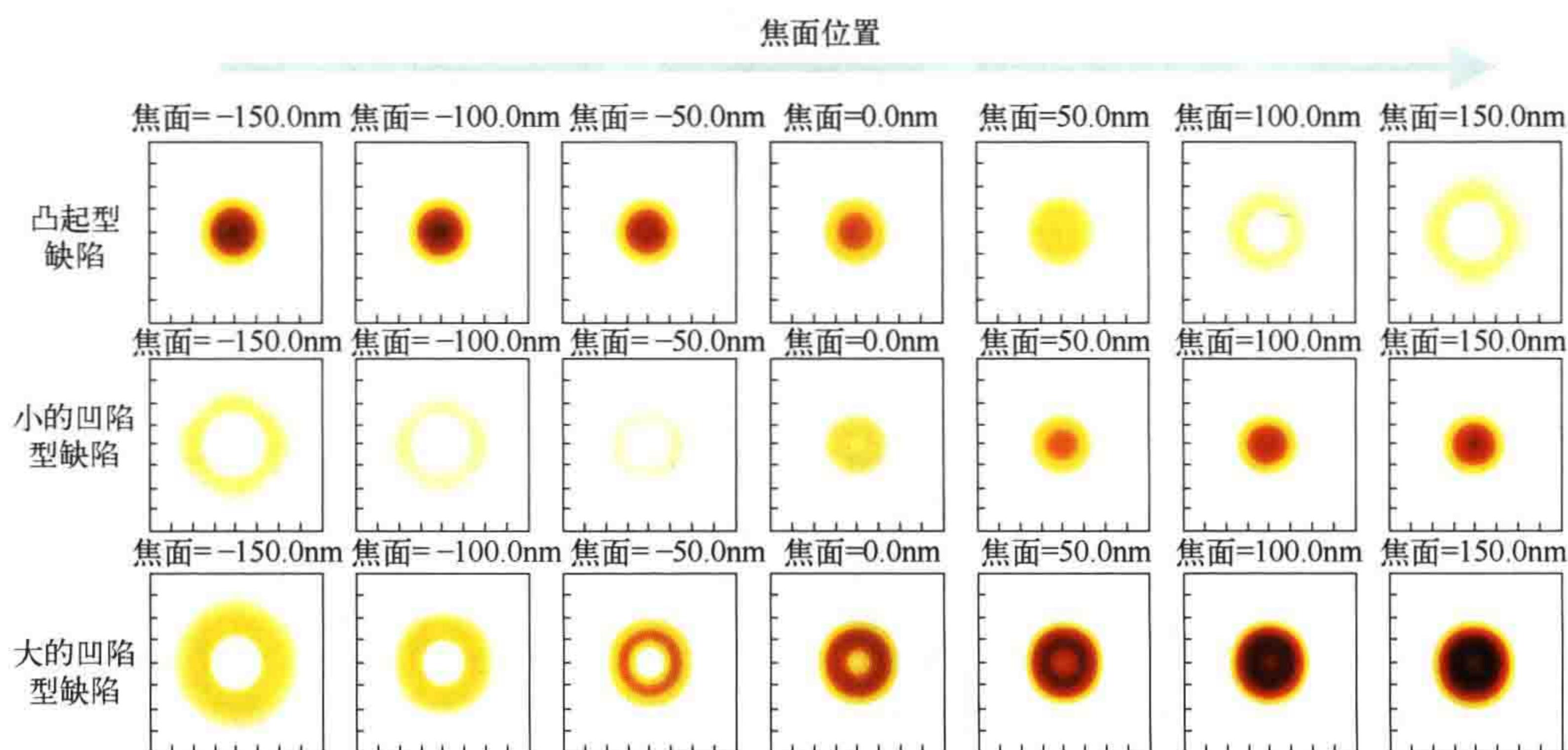


图 6.19 含三个不同缺陷的多层膜的空间像随焦面位置的变化^[82]。凸起型缺陷 ($h_{\text{top}}=2\text{nm}$, $w_{\text{top}}=90\text{nm}$, $h_{\text{bot}}=w_{\text{bot}}=50\text{nm}$, 第一行), 小的凹陷型缺陷 ($h_{\text{top}}=h_{\text{bot}}=-2\text{nm}$, $w_{\text{top}}=w_{\text{bot}}=90\text{nm}$, 中间行), 大的凹陷型缺陷 ($h_{\text{top}}=h_{\text{bot}}=-4\text{nm}$, $w_{\text{top}}=w_{\text{bot}}=130\text{nm}$, 第三行)。最佳焦面指多层膜上方吸收层的理想像面。成像条件: 波长 13.5nm, 数值孔径 0.25, 圆形照明 $\sigma=0.5$

吸收层图形附近缺陷的可印性也与焦面有关。图 6.20 比较了凹陷型缺陷对线空图形可印性的影响(仿真结果和测量结果)。缺陷位于线条的中心位置。它对显影后线条图形的影响很大程度上取决于焦面的位置。在负焦面位置, 凹陷型缺陷导致光强下降, 为扩展的环形光斑(见图 6.19 左下角), 会导致线空图形的空区域变窄。在零焦面和正离焦时, 缺陷引起的强度下降范围更小, 下降程度更严重。它导致两条线发生桥连。仿真和实验中都可以看到这种现象。

添加或移除吸收层材料的方法是标准的缺陷修复方法。通过该方法无法修复或去除多层膜下方/内部的缺陷。但是, 我们可采用类似 OPC 的方法, 通过修改缺陷附近的吸收层补偿缺陷引起的多层膜变形和光强损失^[85]。图 6.21 结合掩模图形

和光刻仿真对这种缺陷补偿方法进行解释。左侧给出了无缺陷参考掩模和相应的像。缺陷降低了多层膜反射率和相应接触孔内的像强度（见中图）。右图中，通过移除接触孔图形附近的吸收层进行缺陷补偿，补偿后的成像结果非常接近无缺陷图形的像。

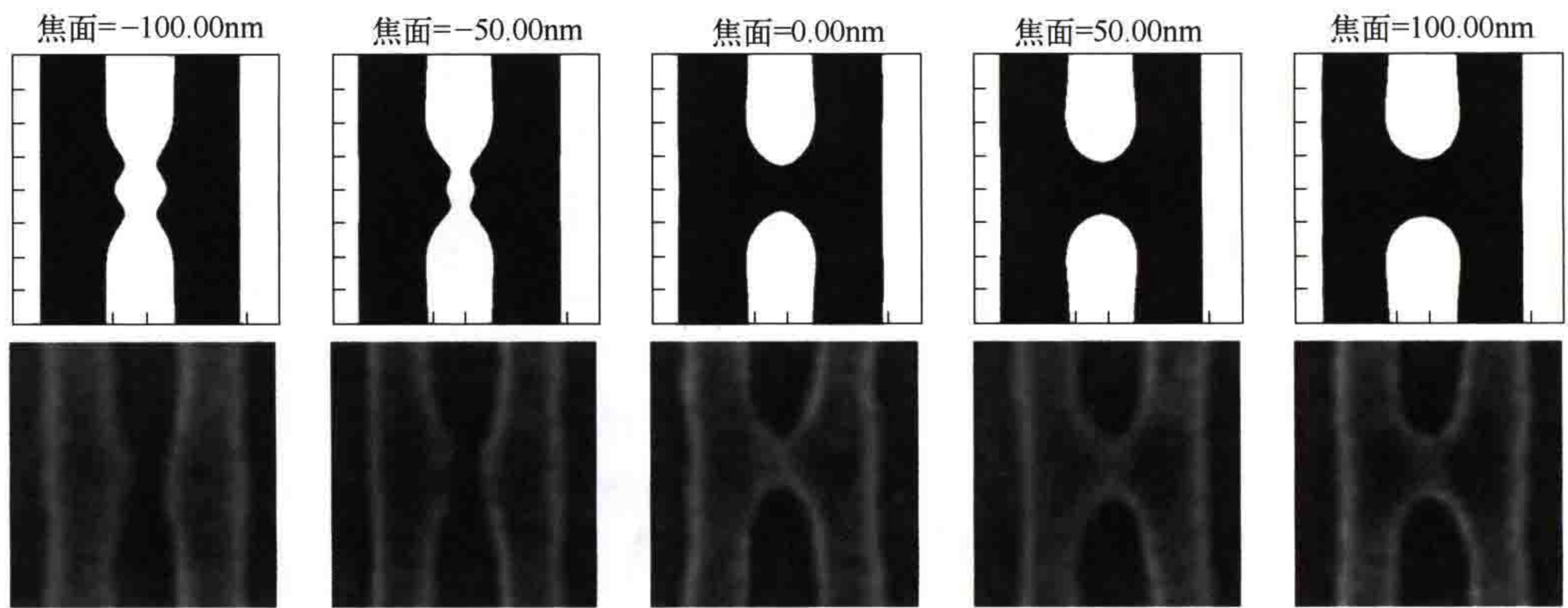


图 6.20 不同焦面位置凹陷型缺陷对 40nm 线条光刻的影响^[82]。第一行：仿真的成像轮廓，缺陷参数 $w_{\text{top}}=90\text{nm}$, $h_{\text{top}}=-5\text{nm}$, $w_{\text{bot}}=w_{\text{top}}$, $h_{\text{bot}}=h_{\text{top}}$ 。第二行：硅片 SEM 图像。采用原子力显微镜 (AFM) 测量的顶部缺陷参数 $w_{\text{bot}}=90\text{nm}$, $h_{\text{top}}=-5\text{nm}$ 。其他参数如图 6.19 所示

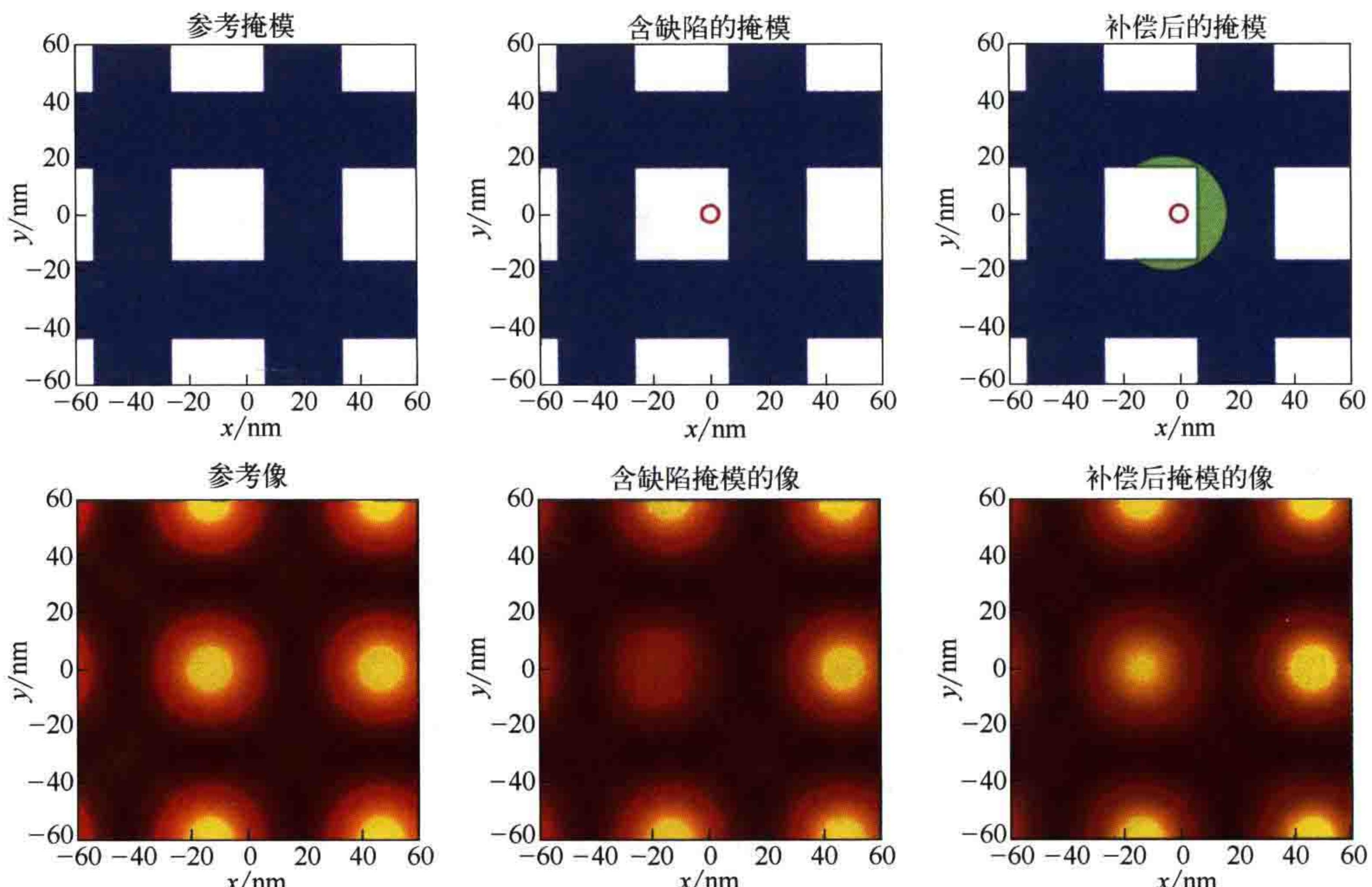


图 6.21 30nm 接触孔阵列中凸起型缺陷补偿过程的仿真示意图^[86]。第一行分别为无缺陷掩模（标准掩模，左），含缺陷掩模（缺陷位置如红色圆圈所示，中），缺陷补偿后的掩模（形状如绿色区域所示，右）。缺陷补偿时移除了绿色区域内的吸收层。理想焦面处的空间像如第二行所示。成像条件：波长 13.5nm, NA=0.25, 圆形照明 $\sigma=0.25$ 。缺陷几何参数： $w_{\text{top}}=50\text{nm}$, $h_{\text{top}}=6\text{nm}$, $w_{\text{top}}=h_{\text{top}}=40\text{nm}$