

## Real-Time Monitoring the High-Aspect-Ratio Nanostructures in the Development by Using Auxiliary Structures \*

CUI Huanhuan, LIU Gang\*, ZHOU Jie, XIONG Ying, TIAN Yangchao

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract:** In order to monitor the height of the high-aspect-ratio nanostructures (HARNST) in the development process, the auxiliary structures are introduced on the same substrate as the nanostructures. The rectangle gratings which display a conveniently detected optical phenomenon with the variation of height, are appropriate to be the auxiliary structures. The  $-1st$  and  $+1st$  diffracted efficiency of the gratings are monitored in the development. The real-time monitoring of HARNST carried out by estimating height according to the  $\pm 1st$  diffracted efficiency and accurately measuring height with their ratios. The rectangle gratings with 50 lines/mm and 160 lines/mm are designed to be auxiliary structures for the monitoring of the HARNST with height up to  $3\mu m$ . The simulation results show that it is effective to monitor the height of HARNST by monitoring the diffracted efficiency of the auxiliary grating. And this method has a universal application to various nanostructures.

**Key words:** MEMS; auxiliary structure; real-time monitoring; high-aspect-ratio nanostructure; diffracted efficiency  
EEACC:4180;4260;7310F doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.05.009

## 基于辅助结构实时监测大高宽比纳米结构显影过程的方法研究 \*

崔焕焕, 刘刚\*, 周杰, 熊瑛, 田扬超

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

**摘要:** 提出了一种引入辅助结构作为显影过程的监测对象来实现对大高宽比纳米结构高度变化进行实时无损监测的方法。随着结构高度的变化, 矩形光栅表现出明显的光学性质的变化, 便于进行光学监测, 适合用作辅助结构。使用光栅负一级和正一级衍射效率两个参数作为监测依据, 首先通过观测它们的起伏变化得到结构大致的高度范围, 然后通过观测负一级与正一级的比值得到结构高度的精确值, 从而实现大高宽比纳米结构高度的实时监测。以高度为  $3\mu m$  的纳米结构为例, 设计了线密度为 50 线/mm 和 160 线/mm 的矩形光栅作为辅助结构来监测显影过程中结构高度的变化。模拟结果表明, 通过监测光栅衍射效率的变化可以有效地监测纳米结构高度的变化, 该方法适用于对大高宽比纳米结构的显影过程进行实时监测。

**关键词:** 微机电系统; 辅助结构; 实时监测; 大高宽比纳米结构; 衍射效率

中图分类号: TN205

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)05-0599-05

近年来, 随着纳米器件研究的不断发展, 大高宽比纳米结构在惯性器件、光学等领域发挥着越来越重要的作用, 具有很好的应用前景<sup>[1-2]</sup>。以用于 X 射线成像的波带片为例, 具有大高宽比的波带片才能获得最佳的成像效果<sup>[3]</sup>。高度作为纳米结构的一个重要参数, 对于器件性能有着至关重要的影响, 需要准确测量、精确控制。纳米结构的高度一般是通过显影形成的, 因此对显影过程进行实时监测以准确控制纳米结构高度是非常必要的。目前, 常规

的检测工具如台阶仪、扫描电子显微镜等都只能在显影结束以后进行测量, 不能进行实时监测。因此, 要精确掌握显影过程中纳米结构的高度变化, 必须要发展合适的实时监测方法。

光学方法由于具有无损等优点最先被用于实时监测<sup>[4-7]</sup>。光学监测方法的主要研究对象是光栅结构。这主要是由于光栅衍射理论和计算机技术的成熟发展, 在光栅结构参数已知的情况下, 可精确地计算出光栅结构的衍射效率。反之, 如果光栅衍射

项目来源: 国家自然科学基金项目(10875125)

收稿日期: 2012-03-03 修改日期: 2012-03-07

效率已知,则可以反推出光栅的结构参数,从而对其结构有一定的了解。近年来,基于光学方法测量光栅结构方面开展了不少的研究工作<sup>[8-11]</sup>。如赵劲松等<sup>[12]</sup>提出了一个实时监测矩形光栅槽型深度的光学模型,通过监测光栅的一级衍射效率对显影过程进行实时监测。该方法依靠衍射曲线的下降沿确认显影终点,这在实际显影过程中很难准确把握。Marciante等<sup>[13]</sup>提出通过使用衍射效率对称级次比值的方法对光栅进行实时监测。这种方法虽然可以提高测量精度,但要求光栅的衍射效率在占空比为常数时,是高度的单值函数。而随着光栅高度的增加,衍射效率曲线逐渐复杂多变,不是单值曲线,所以这种方法适用的光栅深度只有1 μm左右,无法应用于更高的结构。到目前为止,还没有一种方法可以对大高宽比纳米结构的显影过程进行实时无损的监测。

为了解决这一问题,本文提出了一种新的监测方法,在大高宽比纳米结构的制备过程中引入对高度变化具有明显光学效应的辅助结构,通过模拟分析证实了在显影过程中监测辅助结构的衍射效率的变化,实现对大高宽比纳米结构的监测是可行的。辅助结构的引入使得该方法不必局限于周期性结构,具有很好的普适性。

## 1 原理

常见的大高宽比纳米结构一般不具有周期性,即使具有周期性也不一定随高度的变化产生明显的光学效应。因此,很难直接对大高宽比纳米结构进行光学测量。针对这一问题,我们在大高宽比纳米结构的制作过程中引入辅助结构,通过在显影过程中对辅助结构的实时监测,准确把握纳米结构的高度变化。图1为制作大高宽比纳米结构工艺流程示意图,在制备过程中,辅助结构和纳米结构在同一基片上,同时曝光,同时显影,相同的工艺参数使得他们具有相同的高度参数。因此,通过监测辅助结构的高度变化来把握大高宽比纳米结构的高度变化是可行的。

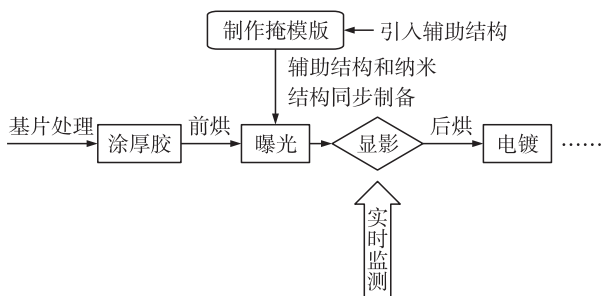


图1 制作大高宽比纳米结构工艺流程示意图

辅助结构要具备两个关键的特性,一是对高度敏感并表现出相应的光学效应以便于监测;二是易于制备。在众多微纳结构中,光栅结构是典型的周期性结构,随着槽深的变化具有明显的光学效应;同时,矩形光栅制备方法简单。因此,我们选择矩形光栅作为辅助结构,在显影过程中以光刻胶不敏感的光束照射辅助结构,通过监测辅助结构衍射效率的变化来把握纳米结构的高度变化。

理论上,可以通过光栅衍射效率反推出光栅的结构参数,但实际的显影过程受很多环境因素影响,衍射效率的理论值和实验值会有较大差别。同时,实验参数的稍许偏差也会造成的衍射效率值的偏离。另外,正如前面提到的,光栅槽深越深,衍射效率曲线越复杂,不再是槽深的单值函数。因此,仅仅通过对光栅效率单一级次的监测是无法得到高度的精确值的。针对这个问题,我们选择辅助结构的负一级和正一级衍射效率作为监测依据,首先通过观测正负一级衍射曲线的起伏变化判断结构大致的高度范围,然后根据负一级与正一级的比值( $R_{-1}/R_{+1}$ )得到高度的精确值,从而实现了对大高宽比纳米结构的高度的实时监测。

一般地,衍射效率的理论值和实验值虽然有一定的偏差,但衍射效率随高度变化的趋势是相似的,所以,通过观测衍射效率的高低变化趋势,可以判断结构的大概高度,给出一个高度值的范围。为了获得纳米结构高度的精确值,我们引入了负正一级的比值 $R_{-1}/R_{+1}$ 作为高度监测的补充。使用比值方法可以显著地改善实验环境对监测精度的影响,这是因为对称级次衍射效率受环境和工艺误差的影响几乎相同,通过比值可以消除这些因素的影响,使得比值的理论曲线与实验曲线基本一致<sup>[14]</sup>。同时,只要在通过单一级次给出的高度值的范围内,比值曲线为高度的单值函数,就可以根据实时给出的 $R_{-1}/R_{+1}$ 值参照理论曲线给出对应的高度值,即为纳米结构的高度。所以,通过引入辅助结构,在显影过程中对矩形光栅的正负一级衍射效率进行实时监测,即可实现对大高宽比纳米结构的高度值的准确测量。

## 2 辅助结构的设计

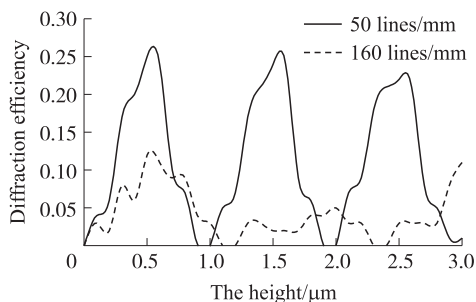
上述的实时监测方法对辅助光栅结构的性能有着严格的要求:正负一级衍射效率曲线随结构高度的变化有着便于观测的起伏;在通过正负一级衍射效率曲线给出的高度值的范围内,比值曲线为高度的单值函数。只有通过合适的结构参数设计才能使得辅助结构的光学特性满足监测需求。所以,辅助

光栅结构参数的设计非常重要。众所周知,严格耦合波理论被广泛的应用于分析电磁波在周期性结构中的传播规律<sup>[15-16]</sup>。矩形光栅是典型的周期性结构,因此本文使用严格耦合波理论来分析计算矩形光栅的衍射效率变化规律。

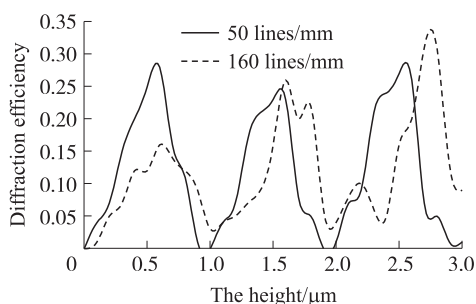
我们利用基于严格耦合波理论的 Gsolver 软件模拟了结构高度由 0  $\mu\text{m}$  到 3  $\mu\text{m}$  的范围内矩形光栅的衍射效率变化曲线。光栅结构参数的设计中,使用实验中比较普遍使用的光刻胶瑞红 RZJ390 作为结构材料进行计算,监测光为光刻胶不敏感的红光,波长为 632.8 nm,入射角选择为 30°。在该波长下,显影液、光刻胶和基片的折射率分别为 1.336, 1.674 和 3.573。通过模拟计算各种线密度的矩形光栅正负一级衍射效率及其比值的变化规律,发现仅仅使用一种线密度的光栅作为辅助结构无法得到足够广(适用于高度在 3  $\mu\text{m}$  以内的纳米结构)的高度监测范围,需要增加不同线密度的光栅来获得所需的监测范围。通过逐渐增加光栅个数进行组合分析计算,最终我们选择了两种线密度的光栅作为辅助结构,分别是线密度为 50 线/mm 和 160 线/mm、占空比均为 0.5 的矩形光栅。本文中光栅的占空比均为 0.5,如果选择其他的占空比,则光栅的线密度也需要通过计算重新选择。

### 3 结果和讨论

图 2 为辅助光栅结构的正负一级衍射效率随高度的变化曲线。从图 2(a)中可以看出,50 线/mm 光栅的正一级衍射效率在 3  $\mu\text{m}$  的高度范围内有着明显的起



(a)正一级衍射效率随高度的变化曲线



(b)负一级衍射效率随高度的变化曲线

图 2 辅助结构衍射效率随高度变化的理论模拟曲线

伏变化,便于对高度进行粗略的判断;而 160 线/mm 光栅的正一级衍射效率变化则不够明显且非常复杂,难以用于高度判断。所以,依靠 50 线/mm 光栅正一级衍射效率的起伏变化即可得到几个大致的高度范围。从图 2(b)中可以看出,50 线/mm 和 160 线/mm 光栅的负一级衍射效率在 3  $\mu\text{m}$  的高度范围内都有着明显的起伏变化。同时,两条衍射曲线多次交替起伏变化,每一段起伏或者交替都可以给出一个明显的高度数值的范围。通过结合两种光栅的负一级衍射效率曲线,可以得到更为细致的高度范围。所以,实践中可以选择观测 50 线/mm 和 160 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线来判断结构大致的高度范围。

图 3 为两个矩形光栅  $R_{-1}/R_{+1}$  随高度的变化曲线。由图 3 可以看到,50 线/mm 的光栅  $R_{-1}/R_{+1}$  曲线随着高度的变化没有明显的起伏变化,无法给出良好的高度单值区域;而 160 线/mm 的光栅则在高度为 1.2  $\mu\text{m}$  到 3  $\mu\text{m}$  的范围内给出了 6 个高度单值区域,只要确定显影结束时高度停在哪个单值区域范围内即可根据 160 线/mm 光栅的  $R_{-1}/R_{+1}$  值得到高度的精确值。160 线/mm 光栅的  $R_{-1}/R_{+1}$  值的 6 个高度单值区间为: 1.2  $\mu\text{m}$  ~ 1.6  $\mu\text{m}$ 、1.6  $\mu\text{m}$  ~ 2.0  $\mu\text{m}$ 、2.0  $\mu\text{m}$  ~ 2.2  $\mu\text{m}$ 、2.2  $\mu\text{m}$  ~ 2.4  $\mu\text{m}$ 、2.4  $\mu\text{m}$  ~ 2.7  $\mu\text{m}$ 、2.7  $\mu\text{m}$  ~ 3.0  $\mu\text{m}$ 。结合图 2(b)可以看出,由以下的光栅衍射效率曲线可以判断出对应的高度范围:根据 50 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的第 2 个上升沿可以判断结构高度范围为 1.2  $\mu\text{m}$  ~ 1.6  $\mu\text{m}$ ;根据 50 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的第 2 个下降沿可以判断结构高度范围为 1.6  $\mu\text{m}$  ~ 2.0  $\mu\text{m}$ ;结合 50 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的第 3 个上升沿和 160 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的上升沿可以判断结构高度范围为 2.0  $\mu\text{m}$  ~ 2.2  $\mu\text{m}$ ;结合 50 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的第 3 个上升沿和 160 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的下降沿可以判断结构高度范围为 2.2  $\mu\text{m}$  ~ 2.4  $\mu\text{m}$ ;结合 50 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的第 3 个下降沿和 160 线/mm 光栅的负一级衍射效率曲线的上升沿以及他们的明暗交替可以判断结构高度

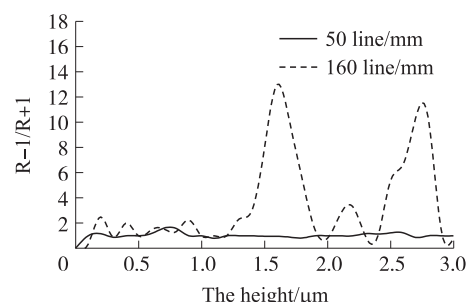


图 3 辅助结构  $R_{-1}/R_{+1}$  曲线随高度变化的理论模拟曲线

范围为 $2.4\ \mu\text{m} \sim 2.7\ \mu\text{m}$ ;结合 $50\ \text{线/mm}$ 光栅的负一级衍射效率曲线的第3个下降沿和 $160\ \text{线/mm}$ 光栅的负一级衍射效率曲线的下降沿可以判断结构高度范围为 $2.7\ \mu\text{m} \sim 3.0\ \mu\text{m}$ 。可以看出,结合 $50\ \text{线/mm}$ 和 $160\ \text{线/mm}$ 光栅的负一级衍射效率曲线判断出的结构的高度范围与 $160\ \text{线/mm}$ 光栅的 $R_{-1}/R_{+1}$ 值的6个高度单值区间相重合。所以,可以利用辅助结构的光栅衍射效率曲线给出的高度范围,确定显影结束时高度停在 $160\ \text{线/mm}$ 光栅的 $R_{-1}/R_{+1}$ 曲线的哪个单值区域内。然后根据监测给出的比值,对照理论模拟曲线即可得到纳米结构显影终点时高度。

由以上分析可知,在显影过程中随着结构高度的不断变化,两个光栅的那些具有明显区分度的光学特性将陆续呈现,使得我们足以清楚地判断停止显影时他们大致的高度范围。同时,根据光栅的 $R_{-1}/R_{+1}$ 值就可以得到高度的精确值。由此可以看出,辅助结构的设计是合适的,选择两个光栅作为辅助结构可以适用于高度在 $3\ \mu\text{m}$ 以内的纳米结构的高度监测。

由图2可以看出,相对于 $160\ \text{线/mm}$ 的光栅, $50\ \text{线/mm}$ 的光栅的一级衍射效率曲线比较简单、变化也比较明显,更适合用于判断结构的高度范围。因此,在设计辅助结构时,为了便于判断结构的高度范围通常会选择低线密度的光栅。由图3可以看出,相对于 $50\ \text{线/mm}$ 的光栅, $160\ \text{线/mm}$ 的光栅的一级衍射效率的比值曲线可以在较大的高度范围内给出多个高度单值区域,并且变化也很明显,适合用于精确给出结构的高度值。因此,在设计辅助结构时,为了便于在较大的高度范围内精确给出结构的高度值通常会选择高线密度的光栅。综合图2、图3可知,在设计辅助结构时,要想在较大的高度范围内实现对纳米结构高度的实时监测,需要选择低线密度与高线密度两种光栅,结合他们的光学特性来实现对高度的监测。

实际应用中,需要根据研究目标的不同来设计不同的辅助结构。对于较为常见的情况,如已知纳米结构高度的大致范围时,则可以简化辅助结构的设计,选择的光栅 $R_{-1}/R_{+1}$ 仅仅在预计的高度范围内有很好的单值性即可。通常设计一种线密度的光栅作为辅助结构就可以满足监测需求。如果需要监测的高度范围较宽,设计两种甚至更多种线密度的光栅组合为辅助结构较为合适。但是,随着光栅数量的增加会导致监测数据增多,加大了实际应用的难度。

为了获到大高宽比纳米结构,目前普遍使用的

是同步辐射X射线光刻技术。同步辐射X射线光刻具有良好的工艺宽容性,大高宽比纳米结构可以和微米或亚微米量级的辅助结构在相同的工艺参数下得到<sup>[17]</sup>。因此,虽然本文设计的辅助结构线密度在微米量级,并不会影响实际的监测效果。

## 4 结论

本文提出了一种通过引入辅助结构来实现对大高宽比纳米结构显影过程进行实时监测的方法。给出了辅助结构的设计要求,讨论了辅助结构相关参数的设计原则。以高度为 $3\ \mu\text{m}$ 的纳米结构为例,设计了线密度为 $50\ \text{线/mm}$ 和 $160\ \text{线/mm}$ 的矩形光栅作为辅助结构来监测显影过程中结构高度的变化。模拟结果表明,通过监测光栅衍射效率的变化可以有效地监测纳米结构高度的变化,为进一步提高大高宽比纳米结构的制备精度提供了有益的参考。

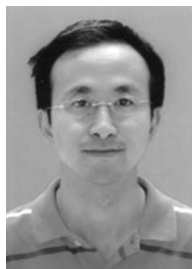
## 参考文献:

- [1] Rinaldi A, Licocchia S, Traversa E. Nanomechanics for MEMS: A Structural Design Perspective[J]. *Nanoscale*, 2011, 3: 811-824.
- [2] 柳龙华, 刘刚, 熊瑛, 等. 大高宽比、高线密度X射线透射光栅的制作[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 72-77.
- [3] 马杰, 曹磊峰, 谢常青, 等. 带支撑结构的大高宽比硬X射线波带片制作[J]. *光电工程*, 2009, 36(10): 30-34.
- [4] Fridman M, Nixon M, Grinvald E, et al. Real-Time Measurement of Space-Variant Polarizations[J]. *Optical Society of America*, 2010, 18(10): 10805-10812.
- [5] Shevchenko Y, Ahamad N U, Ianoul A, et al. In Situ Monitoring of the Formation of Nanoscale Polyelectrolyte Coatings on Optical Fibers Using Surface Plasmon Resonances[J]. *Optical Society of America*, 2010, 18(19): 20409-20421.
- [6] 孟玲, 贾磊, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅的铝电解槽温度在线检测系统[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(2): 204-208.
- [7] Yang S W, Lin C S, Fu S H, et al. Measurement of Microlens Array Using Optical Interferometric Microscope [J]. *Optics Communications*, 2012, 285: 1066-1074.
- [8] Roger A, Breidne M. Grating Orofile Reconstruction by an Inverse Scattering Method[J]. *Opt Commun*, 1980, 35(3): 299-302.
- [9] Madrazo A, Nieto Vesperinas M. Surface Structure and Oolariton Interactions in the Scattering of Electromagnetic Waves from a Cylinder in front of a Aconducting Grating: Theory for the Reflection Photon Scanning Tunneling Microscope[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(4): 785-795.
- [10] Coulombe S A, Minhas B K, Raymond C J et al. Scatterometry Measurement of Sub-0.1  $\mu\text{m}$  Linewidth Gratings[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1998, 16(1): 80-87.
- [11] Wei S M, Li L F. Measurement of Photoresist Grating Profiles Based on Multiwavelength Scatterometry and Artificial Neural Network[J]. *Appl Optics*, 2008, 47(13): 2524-2532.
- [12] 赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论

- 模拟[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1146-1150.
- [13] Marcianite J R, Farniga N O, Hirsh J I et al. Optical Measurement of Depth and Duty Cycle for Binary Diffraction Gratings with Subwavelength Features[J]. Appl Optics, 2003, 42(16): 3234-3240.
- [14] 李建龙, 傅克祥, 张丽娟. 用光栅的 $\pm 1$ 级能量之比测量光栅参量[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1324-1328.
- [15] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A. Formulation for Stable and Efficient Implementation of the Rigorous Coupled-Wave Analysis of Binary Gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [16] 张娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1739-1743.
- [17] 张东平, 乐德芬, 胡一贯. 同步辐射 X 射线光刻技术[J]. 应用光学, 2001, 22(4): 40-45.



崔焕焕(1987-), 女, 在读硕士研究生。主要研究方向为微纳加工技术, cuiha@mail.ustc.edu.cn;



刘 刚(1972-), 男, 博士, 副研究员。主要从事微纳加工技术及器件相关研究和高空间分辨 X 射线成像技术研究, liugang@ustc.edu.cn。