

部分相干成像下的空间线宽确定

杨 健 伍树东 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

经过推导,得到部分相干照明条件下轴对称光学系统的直边阈值表达式;对有限扫描缝宽,也得到相应的直边阈值。提出确定阈值的方法;并对复振幅直边线条像进行数值计算,结果表明,阈值表达式与计算值相符,准确度达到 $0.01\mu\text{m}$ 。

一、部分相干直边阈值

从直边像确定其几何边缘位置,必须知道对应于边缘的像强度值,即直边阈值;边缘的确定是集成电路线宽测量中的重要问题^[1~3]。

直边物体的振幅透射函数可表为:

$$F(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0), \\ \sqrt{T} \exp i\varphi & (x < 0). \end{cases} \quad (1)$$

D. Nyssonen^[2]从相干成像公式出发,导出了直边阈值:

$$T_c = 0.25(1 + T + 2\sqrt{T} \cos \varphi), \quad (2)$$

用类似方法可导出非相干成像的直边阈值:

$$T_n = 0.5(1 + T). \quad (3)$$

光学显微镜成像一般是部分相干照明,系统相干性质可用相干参数 R 表征其值小,则相干度高。D. Nyssonen选用 R 值较小的测试条件,并以相干阈值近似值代替部分相干阈值,这种方法使测试条件受到限制,且直边定位准确度不能再提高。下面推导部分相干直边阈值。

为简明起见,考虑一维成像系统,部分相干准单色光照明下的像强度是^[4]:

$$I(x) = \iint_{-\infty}^{\infty} J(x_0 - x'_0) F(x_0) F^*(x'_0) h(x - x_0) h^*(x - x'_0) dx_0 dx'_0, \quad (4)$$

式中 $J(x_0 - x'_0)$ 是照明光在物面 x_0 和 x'_0 两点间的强度; F 是物振幅透射函数,对于直边物体,其形式由式(1)给出; h 是成像系统的点扩散函数。

设显微成像是轴对称的(非对称引起定位误差,是不可取的),并用Köhler照明方式。为求 $x=0$ 处的相对光强,先引入归一化因子 $I(\infty)$;由于 h 有显值的区域比物面被照明区域小得多,通过(4)式可得:

$$I(\infty) = \iint_{-\infty}^{\infty} J(x_0 - x'_0) h(x_0) h^*(x'_0) dx_0 dx'_0. \quad (5)$$

此积分可化成 $I(\infty) = 2A + 2B$, 其中

$$A = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 - x'_0) h(x_0) h^*(x'_0) dx_0 dx'_0,$$

$$B = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 + x'_0) h(x_0) h^*(x'_0) dx_0 dx'_0.$$

将(1)式代入(5)式得:

$$I(x) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 - x'_0) h(x - x_0) h^*(x_0 - x'_0) dx_0 dx'_0$$

$$+ \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 - x'_0) h(x + x_0) h^*(x + x'_0) dx_0 dx'_0$$

$$+ \sqrt{T} e^{j\varphi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 + x'_0) h(x - x_0) h(x + x_0) dx_0 dx'_0$$

$$+ \sqrt{T} e^{-j\varphi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 + x'_0) h(x + x_0) h(x - x'_0) dx_0 dx'_0. \quad (6)$$

令 $x=0$, 得边缘的强度值为

$$I(0) = (1+T)A + 2B\sqrt{T} \cos \varphi.$$

因此, 部分相干成像的直边阈值为

$$T_p \equiv I(0)/I(\infty) = 0.5(1+T)\alpha + 0.25(1+T+2\sqrt{T} \cos \varphi)(1-\alpha)$$

$$= \alpha T_n + (1-\alpha)T_o, \quad (7)$$

其中

$$\alpha = \frac{A-B}{A+B}.$$

T_o 和 T_n 分别由(2)式和(3)式确定。(7)式表明阈值 T_p 是非相干阈值和相干阈值的带权叠加; 参数 α 与直边的参量 T 、 φ 无关, 是一个表征光学系统特征的参量。

二、有限扫描缝宽情况

在光电扫描显微镜中, 要用一狭缝来测量像点强度, 取狭缝函数

$$S(x) = \begin{cases} 1 & (|x| \leq l/2), \\ 0 & (|x| > l/2). \end{cases} \quad (8)$$

加狭缝后接收到的光强 $\bar{I}(x)$ 是 $S(x)$ 与光强 $I(x)$ 的卷积, 边缘处 $\bar{I}(0) = \int_{-l/2}^{l/2} I(y) dy$ 。将 I 的表达式代入上式得:

$$\bar{I}(0) = \bar{A}(1+T) + 2\bar{B}\sqrt{T} \cos \varphi, \quad (9)$$

其中

$$\bar{A} = \int_{-l/2}^{+l/2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} J(x_0 - x'_0) h(y - x_0) h^*(y - x'_0) dx_0 dx'_0 dy,$$

$$\bar{B} = \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^{\infty} J(x_0 + x'_0) h(y + x_0) h^*(y - x'_0) dx_0 dx'_0 dy。$$

用 $\bar{I}(\infty)$ 作为归一化因子, 得到有狭缝时直边阈值:

$$\bar{T}_p = \bar{a}T_n + (1 + \bar{a})T_s, \quad (10)$$

其中

$$\bar{a} = (\bar{A} - \bar{B}) / (\bar{A} + \bar{B})。$$

可以看出, (10)式与(7)式的不同点在于 A 和 B 换成了 \bar{A} 和 \bar{B} ; 这样, 缝宽对直边阈值的影响可完全归结到数 \bar{a} 中, 只要知道了系统的 \bar{a} 值, 就能用(10)式对直边准确定位。

为确定参数 \bar{a} , 令(1)式的 $T=1$, $\varphi=\pi$, 代入(10)式得到 $\bar{T}_p = \bar{a}$ 。这说明 \bar{a} 是 π 相位直边物体成像后对应几何边缘的相对光强值; 它是一个可测量, 也可计算得到。

三、实验方法

从(6)式可知 π 相位直边像对称于 $x=0$ 点。有限扫描缝宽也不会影响其对称性。这样, 通过测量 π 相位直边像, 可由对称中心点的相对光强得到 \bar{a} 值。

获得光学系统及直边物的某些参数值后, 也能用标量衍射积分计算得到边缘点光强值, 但阈值公式法比这简便, 而且, 本文的方法还可适用于不知像差大小、不知扫描缝宽及相干参数 R 的光学系统。在推导(2)和(3)式中, 可允许光学系统有轴对称像差, 即在相干或非相干情况下, 对称像差不影响直边像的边缘强度值, 对相干情况的离焦像已有计算结果表明是如此^[5]。在部分相干情况下, 直边像边缘处光强要随像差而改变^[2]; 当引入参数 \bar{a} , 并知道了 T 和 φ 后, 可把光学系统当作一“黑箱”, 通过考察 π 相位直边在此“黑箱”的行为, 能确定直边像边缘处光强值, 进行定位。

线宽的测量可近似地认为两条边成像互不影响, 通过直边阈值确定两条边的位置, 其间距就是线宽值。

四、数值计算结果

部分相干成像是物函数的非线性叠加, 其数值计算较繁, 作者使用了 Kintner^[6] 的方法计算无像差光学系统的直边线条像。

图 1 是宽为 $2\mu\text{m}$ 的线在三种相干参数下的像轮廓, 随着 R 由小到大, 曲线由快速到平缓变化, 边缘点光强值由小到大, 用相干阈值的定位误差也将加大。阈值法不能消除两条边相互影响所导致的定位误差, 因此寻找合适的 R 值, 使其影响较小; 轮廓 b 在 $x=0$ 处的光强值接近于 1, 此时影响较小。

图 2 是相干参数 $R=0.4/0.65$, 不同线宽的线条像。随着线宽减小, 两条边的相互影响增加, 以致曲线形状改变。此时, $0.5\mu\text{m}$ 最窄线宽的定位误差, 用部分相干阈值时是 $0.010\mu\text{m}$, 相干阈值时是 $0.022\mu\text{m}$ (见表 3)。

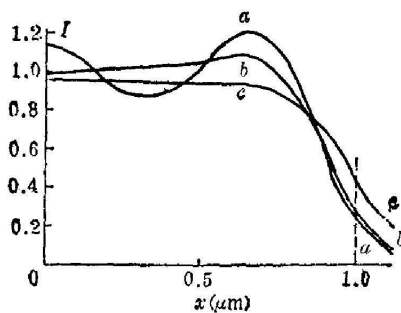


图 1

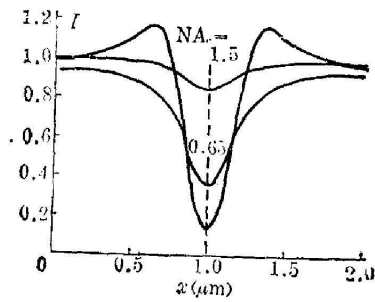


图 2

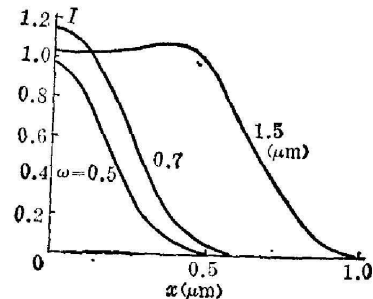


图 3

从图 1 和图 2 可见, $x=0$ 处的光强随参数变化较大, 以此作为归一化因子将引起额外的定位误差, 应用 $I(\infty)$ 作归化因子, 此值可在一较大通光区测出。

图 3 是 π 相位直边像, 它们的光强最小值都落在几何边缘点, 且其轮廓对称于此点, 边缘点光强值随 R 增大而减小, 具体数值见表 1。

表 1 π 相位边缘处光强 \bar{a} 与 R 的关系, 除聚光镜数值孔径 NA_c 外, 其余参数同图 3

Table 1 Relations between the coherence R and the normal intensity \bar{a} at the phase edge microscope parameters same as Fig. 3 except condenser NA_c .

NA_c	0.0	0.1	0.4	0.65	1.50
$R = NA_c/NA$	0.0	0.15	0.62	1.00	2.31
\bar{a}	0.092	0.092	0.125	0.364	0.849

表 2 不同相干参数 R 下的定位误差 Δ , 除聚光镜数值孔径 NA_c 外, 其余参数同图 1

Table 2 Edge location errors with different coherence parameters, microscope parameters same as Fig. 1 except condenser NA_c .

聚光镜数值孔径 NA_c	0.0	0.3	0.4	0.5	0.65	1.5	
边缘光强 I_e	0.256	0.274	0.281	0.286	0.333	0.454	
相干定位	T_c	0.25					
	$\Delta(\mu m)$	0.002	0.009	0.013	0.014	0.038	0.093
部分相干定位	\bar{T}_p	0.273	—	0.281	—	0.341	0.462
	$\Delta(\mu m)$	-0.005	—	0.000	—	-0.004	-0.004

图 3 不同线宽 W 的定位误差 Δ 除线宽外, 其余参数同图 2

Table 3 Edge location errors of different linewidths W with parameters same as Fig. 2 except linewidth

线宽 $W(\mu m)$	0.5	0.7	1.5	2.0	3.0
边缘点光强 I_e	0.315	0.289	0.278	0.281	0.279
相干定位	T_c	0.250			
	$\Delta(\mu m)$	0.022	0.014	0.011	0.013
部分相干定位	\bar{T}_p	0.281			
	$\Delta(\mu m)$	0.010	0.003	-0.001	0.000

表 4 不同背景透过率 T 时的定位误差 Δ 聚光镜数值孔径 $NA_c=0.4$, 相位差 $\varphi=\pi/2$,
 $\sqrt{T}=0.30, 0.40, 0.50, 0.60$, 其余参数同图 1

Table 4 Edge location errors with different back ground transmittances T ,
 condenser $NA_c=0.4$, phase difference $\varphi=\pi/2$, $\sqrt{T}=0.30, 0.40, 0.50, 0.60$
 other parameters same as Fig. 1

背景振幅透过率 \sqrt{T}		0.30	0.40	0.50	0.60
边缘点光强 I_e		0.307	0.326	0.351	0.382
相干定位	T_c	0.273	0.290	0.313	0.340
	$\Delta(\mu\text{m})$	0.015	0.017	0.021	0.029
部分相干定位	T_p	0.306	0.326	0.351	0.382
	$\Delta(\mu\text{m})$	0.000	0.000	0.000	0.000

对不同相干参数, 线宽及不同背景透过率等多种情况, 用部分相干阈值(10)式的定位误差同数值计算结果的比较见表 2~4; 用相干阈值(2)式的定位误差也列于表内作为对照。表中 I_e 是数值计算得到的边缘处光强, Δ 是由阈值公式定位而引起的定位误差(阈值对应的位置到几何边缘的距离)。

从上列表中可见, 用阈值 T_p 的定位准确度很高, 在计算结果中最大定位误差为 $0.01 \mu\text{m}$ 。计算线条像只用了周期近似, 通过计算和分析认为相对光强的误差约为 0.001, 使用的 Alpha Micro 微计算机, 六十像元的一条轮廓计算时间约为 30 秒。

五、讨 论

1. 为从(10)式中求 T_p 值, 必须已知 T 和 φ 。 T 的确定较容易, 在较大的透光区域和不透光区域测出 I_{\max} 和 I_{\min} , 则 $T=I_{\min}/I_{\max}$; φ 的确定比较困难些, 可用其它方法测量, 作者认为也可以改变系统参数 \bar{a} , 在多次线宽测量中获取 φ 的信息。

2. 对于无像差光学系统, 当物振幅透射函数是实数时, 可根据像在焦面前后的对称性确定调焦位置。对其它情况下的调焦判定, 一般来说无规可循。本文提出的判断方法是: 知道了 \bar{a} 、 T 和 φ 后, 使被测线宽值最小时的调焦是最佳的。

3. 对成像公式(4)有意义的是准单色光照明。考虑光谱较宽情况, 像强度必须对波长进行一次积分, 是强度的线性叠加。如果 π 相位直边对整个光谱是基本一致的, 并且被测物在此区域色散不明显, 则在多色光照明下, 也有类似式(10)的直边阈值表达式, 这使得有可能在一般光源照明下进行线宽精密测量, 对实际工作带来便利。

4. 在制备 π 相位直边时, 一般会有些吸收, 无像差计算结果表明, 当 T 小至 0.8 时, 的确 \bar{a} 的误差还很小(见图 4)。

5. 计算结果表明, 当扫描缝宽在一定范围增大时, 像轮廓变化不大, 见图 5。因此可在

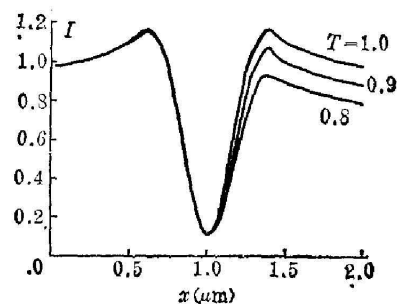


图 4

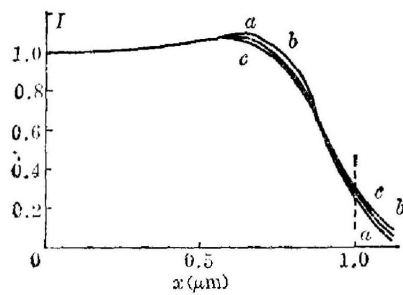


图 5

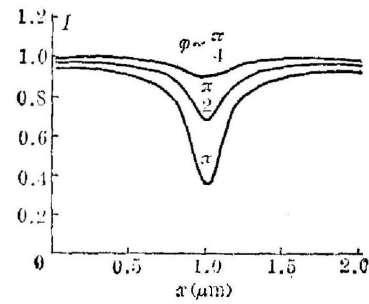


图 6

测量中适当加大缝宽以提高信噪比。

6. 用普通显微镜能观察大相位物体,对相位差较小的物体就不灵敏。图6给出了相干参数 $R=0.9/0.9$, 相位差分别是 π , $\frac{\pi}{2}$ 和 $\frac{\pi}{4}$ 的直边像。

7. 前面考虑的都是无穷陡的直边,实际上大多不如此,因此有必要探讨如何用光学方法获得边的形状。在线的厚度较大时,该用矢量理论处理^[2]。

六、结 论

在部分相干成像条件下,本文导得直边阈值表达式。部分相干照明是光学显微观察较一般的情况。因而利用本文结果,线宽的测定可以在非常普通的条件下进行。

本工作得到中国科学院上海光学精密机械研究所信息组同志帮助,在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] D. Nyssonen; *SPIE*, 1979, **194**, 34.
- [2] D. Nyssonen; *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**, No. 10 (Oct), 1425.
- [3] D. Nyssonen; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 8 (Aug), 2223.
- [4] M. Born and E. Wolf; *«Principles of Optics»*, (6th ed Pergmon Press, 1980), 529.
- [5] J. D. Cuthbert; *Solid State Tech.*, 1977, **20**, No. 8 (Aug), 59.
- [6] E. C. Kintner; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 17 (Sep), 2747.

Determination of spatial linewidth with partially coherent imagery

YANG JIAN WU SHUDONG AND WANG ZHIJIANG

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 16 December 1983; revised 17 April 1984)

Abstract

In this paper, the straight-edge-threshold in an axis-symmetrical imaging system is deduced based on the theory of partial coherence, and the effect of the scanning slit width is also considered. An experimental method is discussed with a π phase edge plate. The comparison of the calculated value and the threshold shows a good agreement. The location accuracy reaches to $0.01 \mu\text{m}$.