

文章编号:1001-4888(2019)02-0191-09

基于透射电镜晶格图像数字云纹的应变测量方法^{*}

高智逊¹, 马路路¹, 邢华丹¹, 赵煜乘¹, 仇巍^{1,2}

(1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津大学, 天津 300350; 2. 现代工程力学天津市重点实验室, 天津 300350)

摘要:提出一种通过量化几何转角实现应变测量的数字云纹新方法。该方法以高分辨透射电镜(TEM)获取的晶格图像为基础,通过傅立叶变换-反傅里叶变换,将 TEM 晶格图像生成三个不同倾角的栅线图。以已知应变状态位置获取的 TEM 栅线图作为参考栅,以所需测量位置获得的栅线图作为试件栅,分别对倾角接近的参考栅与试件栅进行逻辑运算,得到各倾角栅对应的数字云纹图像。基于几何云纹基本原理,建立参考栅与试件栅二者之间栅线倾角的变化(即栅线转角 θ)、该栅线倾角所对应几何云纹条纹的倾角 ϕ 与栅线间距变化率(即栅线法向应变分量 ϵ)之间的解析关系。计量栅线转角与几何云纹条纹的倾角便能够得到试件栅位置上三个不同方向的正应变,从而实现面内应变各分量的解耦测量。由于本方法获得的是高分辨 TEM 图像所在位置的应变平均信息,因此具有十纳米量级的空间分辨率。本文采用模拟实验对以上方法的正确性进行了验证,并将其应用于多层异质半导体结构横截面样品的应变分析,并给出了面内应变各分量的细节信息。

关键词:晶格图像;高分辨透射电镜(TEM);数字云纹;应变测量;栅线转角;条纹倾角

中图分类号: O348.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-125

0 引言

微纳米尺度下应力/应变测量方法是实验力学研究的重要方向之一。在已有的方法中,显微拉曼光谱法具有微米级空间分辨率、无损非接触、对本征和非本征应力均敏感等特点,成为研究半导体、低维纳米材料等微米尺度力学行为的有效实验手段^[1,2]。在纳米尺度下,扫描探针显微镜(SPM)、扫描电子显微镜(SEM)与透射电子显微镜(TEM)是主要的观测手段。将 SPM、SEM、TEM 的高分辨能力与光测力学的测量理论相结合,发展出了若干种具有纳观尺度分辨率的实验力学新方法。例如,戴福隆^[3]、邢永明^[4]、刘战伟^[5]、谢惠民^[6]等提出了纳米云纹技术,该方法以样品表面的晶格结构或制作有规则的点阵结构作为试件栅,SPM/SEM 的扫描线作为参考栅,在扫描成像的过程中形成云纹;赵春旺等^[7-9]基于高分辨透射电镜获得的晶格图像,运用几何相位算法技术并结合数值云纹算法,实现了纳观尺度区域内变形场的精细表征;Hyttch 等^[10]通过对 TEM 系统进行分光改造,实现了参考光路与测试光路的双电子束干涉成像,从而发展出了电子云纹干涉技术。综合以上可见,尽管各自的原理不同,现有的基于现代显微技术的实验力学手段均实现了具有纳米乃至亚纳米分辨率的全场变形测量。然而,从纳米到微米之间,特别是十纳米到百纳米之间这个过渡的尺度量级上,尚缺少一种有效的实验手段,这使得在跨尺度的实验力学分析中,纳观尺度与微观尺度的实验分析结果时常难以建立量化的关联。

数字云纹方法是由 Asundi 等^[11-13]将数字逻辑运算与传统云纹技术相结合而提出的光测力学技

^{*} 收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(11772223, 11772227, 61727810)资助

通讯作者: 仇巍(1978—),男,博士,教授。主要研究领域:实验固体力学。Email: qiuwei@tju.edu.cn

术,通过对数字栅与试件栅的数字图像进行逻辑运算形成云纹实现变形分析。在此基础上,谭晓华^[14]、李晓雷^[15,17]、肖霞^[16]等提出了基于水平-竖直正交网格栅和基于同心环-放射线正交网格栅的数字云纹技术,并将其成功应用于软材料大变形实验分析。事实上,对于晶体材料而言,其高分辨 TEM 图像为材料三维晶格结构的二维投影,体现为有序的非正交的网格栅。因此,有可能基于 TEM 图像并采用数字云纹技术实现变形分析。

本文提出了一种基于 TEM 晶格图像的数字云纹新方法。文中首先给出该方法的测量原理,并通过模拟实验对该方法的正确性进行了验证,随后通过将该方法应用于分析硅锆合金缓冲应变硅材料横截面不同位置的高分辨 TEM 图像,给出了缓冲层内部的应变状态细节信息。

1 测量原理

由图 1(a)给出的单晶硅(011)晶面的高分辨 TEM 图像可见,立方晶格结构的二维投影显现为非正交的网格。对图 1(a)进行傅立叶变换得到图 1(b),其中的星形亮点为材料晶格的倒格子。图 1(a)晶面的面间距 d 与图 1(b)中的倒格矢 g 的长度成倒数关系,即 $d=1/|g|$ 。图 1(b)中 g_1 , g_2 与 g_3 三个矢量分别代表晶格结构三个不同晶向 $[1\ 1\ -1]$ 、 $[1\ 0\ 0]$ 和 $[1\ -1\ 1]$ 。任取 g_1 , g_2 与 g_3 中的一个而屏蔽掉另外两个再对图 1(b)进行反傅立叶变换,可以得到三个倾角各异的栅线图(如图 1(c)~(e)),其各自栅线的法向方向即为 g_1 , g_2 与 g_3 矢量的方向。

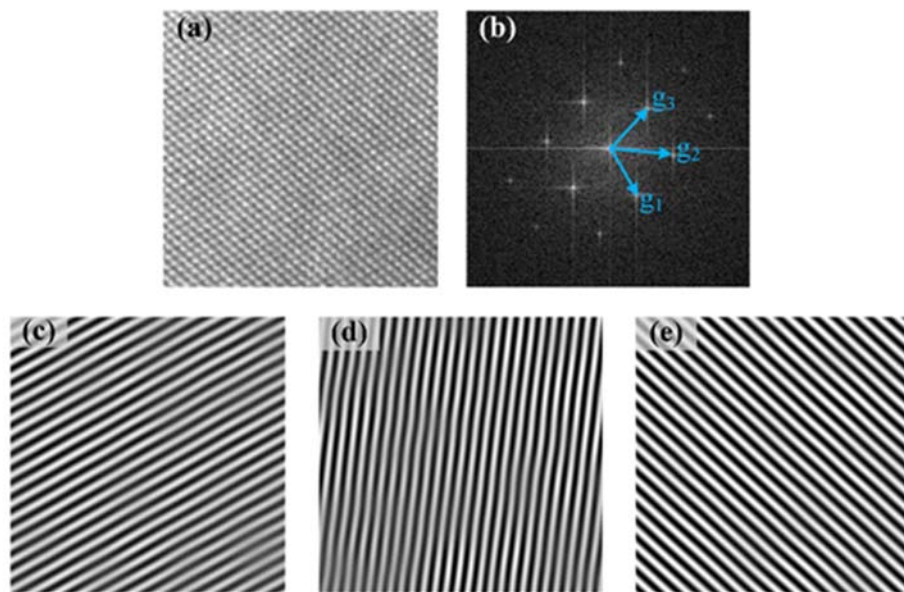


图 1 (a)单晶硅(011)晶面的高分辨 TEM 图像;(b)图(a)傅立叶变换后的衍射图像;
(c)-(e)反傅立叶变换得到的 g_1 , g_2 和 g_3 方向的栅线图

Fig. 1 (a) High resolution TEM image of c-Si on (011) crystal plane;
(b) Fourier transform image of (a); (c)-(e) grating patterns in g_1 , g_2
and g_3 directions, respectively, achieved by anti-Fourier transform

云纹法的基本单元是栅线,当两组不同的栅线进行叠加时,不均匀的光强分布便会产生云纹,云纹条纹会随着栅线几何形状的微小改变而发生位置、形状与密度的变化。云纹法就是通过测量条纹的变化来分析物体的变形场。其中,当两组栅距不同的栅线平行叠加时,通常是试件栅仅发生垂直或平行栅线方向的线应变,此时出现的条纹如图 2(a)所示,通常称为平行云纹;当两组栅线栅距与倾角均不同时叠加出现的云纹条纹如图 2(b)所示,通常是试件栅既存在线应变也存在一定转角,因此称为转角云纹。当转角(即两组栅线的夹角)为 0 时,转角云纹即成为平行云纹,因此平行云纹是转角云纹的一种特例。

转角云纹的形成原理如图 3 所示,假设整体均匀变形,其中 p 和 p_1 分别为参考栅和试件栅的栅距;两组光栅的栅线夹角(即栅线转角)为 θ ;条纹倾角(即条纹与参考栅之间的夹角,取锐角)为 ϕ 。相比参

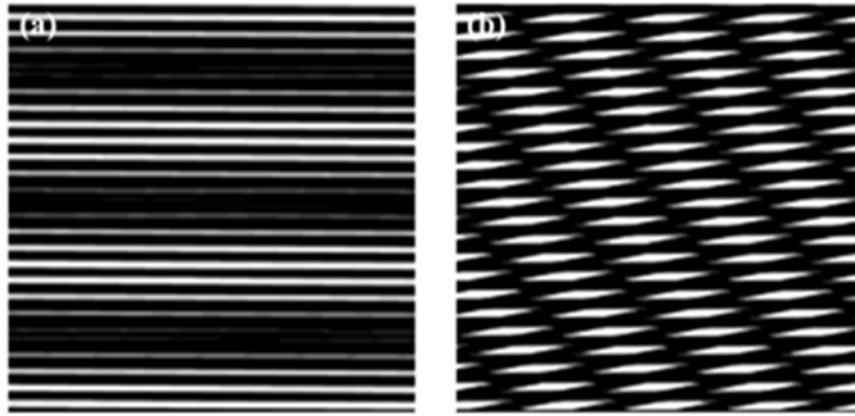


图2 (a)栅距不同的两幅平行栅线叠加形成的云纹;(b)栅距与倾角均不同的两幅栅线叠加形成的云纹
Fig.2 (a) Moiré formed by two groups of parallel grating lines with different grating pitch;
(b) Moiré formed by two groups of grating lines with different pitch and rotation angle

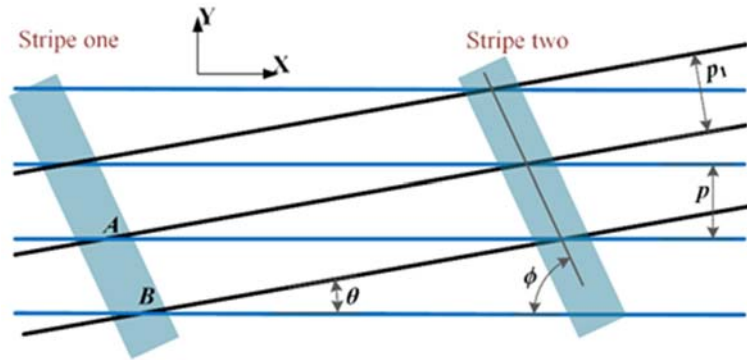


图3 转角云纹示意图

Fig.3 Schematic diagram of the rotation Moiré

考栅,试件栅的栅距变化率即为试件在垂直于栅线方向的线应变 ϵ ,如式(1)。

$$\epsilon = \frac{p_1 - p}{p} = \frac{p_1}{p} - 1 \quad (1)$$

图3中,AB间距的表达式如式(2):

$$\overline{AB} = \frac{p}{\sin\phi} = \frac{p_1}{\sin(\phi + \theta)} \quad (2)$$

由式(2)可得:

$$\frac{p_1}{p} = \frac{\sin(\phi + \theta)}{\sin\phi} \quad (3)$$

结合式(1)和式(3)得:

$$\epsilon = \frac{\sin(\phi + \theta)}{\sin\phi} - 1 \quad (4)$$

由式(4)给出的关系可知,通过计量转角云纹图中栅线转角 θ 及条纹倾角 ϕ 就能够得出应变 ϵ 。

采用数字云纹技术分析 TEM 栅,获得转角云纹。传统云纹法中,条纹是两组光栅叠合后光线透过率的总体效果。而数字云纹则是通过如表1所示的逻辑运算实现类似于传统云纹的“光学”效果。其中,逻辑运算采用的是与(AND)、或(OR)以及非(XOR)三种逻辑关系。

表 1 数字云纹运算中的逻辑运算^[17]
Tab. 1 Logical operation in digital Moiré^[17]

参考栅	试件栅	AND	OR	XOR	云纹	逻辑
0	0	0	0	0	亮条纹	1
1	0	0	1	1	暗条纹	0
1	1	1	1	0	亮条纹	1
0	1	0	1	1	暗条纹	0



图 4 基于透射电镜晶格图像的数字云纹应变测量方法流程图

Fig. 4 Flow chart of strain metrology of digital Moiré based on TEM lattice images

基于以上原理与算法,本文提出的基于透射电镜晶格图像的数字云纹应变测量方法流程图如图 4。首先,采用如图 1 所示的傅里叶变换-反傅里叶变换处理,得到 TEM 栅(同一 TEM 图像对应三幅 TEM 栅,栅线的法向方向为 $g_i (i=1\sim3)$),其中以同一试件上已知应变状态(或同等放大倍数下标准试件)的 TEM 栅为参考栅,以待测位置的 TEM 栅为试件栅。获得各栅线图中所有栅线的中心线^[18],通过线性拟合得到所有栅线的倾角并给出平均值。对比同一组参考栅与试件栅,获得栅线倾角的细微变化(即二者之间的栅线转角) θ 。同时,将 TEM 栅二值化处理后进行逻辑运算形成数字云纹,计量云纹图中条纹的倾角 ϕ 。将 θ 与 ϕ 代入到式(4)给出的数学关系中,得到该组栅的法向方向线应变 $\alpha_i (i=1\sim3)$ 。在两向应力状态下,利用应变花公式可以建立任意方向上 ϵ_α 与直角坐标系下面内应变的三个分量 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_{xy} 间的解析关系。在本文实验中根据得到的三组栅的法向线应变 α_1 、 α_2 、 α_3 ,结合式(5)可进一步获得面内应变的三个分量 ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} 。式(5)中的 α 为栅的法向线应变方向与坐标系 x 轴夹角。

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha_1 & \frac{1}{2}\sin 2\alpha_1 \\ 1 & \cos 2\alpha_2 & \frac{1}{2}\sin 2\alpha_2 \\ 1 & \cos 2\alpha_3 & \frac{1}{2}\sin 2\alpha_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由以上原理可见,本文所提出的方法与现有几何相位法等其他 TEM 云纹技术的不同之处在于:
(1) 本文采用转角云纹算法,利用参考栅变形导致的栅线倾角的细微变化及其所引起的云纹来计量参考栅的变形;
(2) 该方法给出的是所分析试件栅相对于参考栅的平均应变,即每套图像代表一个测点;
(3) 通过提取 TEM 晶格图像三个方向的栅线获得同一测点的三个线应变,实现面内应变张量各分量的测量。

2 实验

2.1 材料与样品制备

本文使用了两种结构相似的硅基多层异质半导体材料,其结构如图 5 所示。材料采用分子外延技术制备,基底为(001)单晶硅;在基底上是成分梯度渐变缓冲层,其 Ge 含量从 0 开始线性增加至 N ($\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, $x=0\sim N$);成分渐变缓冲层上方为成分固定缓冲层,成分为 $\text{Ge}_N\text{Si}_{1-N}$;上表面为应变硅层,厚度约为 10nm。材料一中, $N=0.3$, $h_1=0.6\mu\text{m}$, $h_2=3.0\mu\text{m}$;材料二中, $N=0.2$, $h_1=0.9\mu\text{m}$, $h_2=2.7\mu\text{m}$ 。

本文制备了以上材料的横截面样品,其制备过程如下:将材料和用做研磨掩体的单晶硅片切割成长条并使用加热后的液态环氧树脂为胶黏剂将二者粘合;待环氧树脂完全固化后,使用砂纸对试件两侧的横截面进行研磨,砂纸目数从 600 目至 10000 目逐级增加;最后使用二氧化硅悬浮抛光液对试件两侧表面进行抛光,得到横截面样品。对横截面样品进行机械减薄,再通过离子减薄达到透射电镜观测样品的要求,获得 TEM 样品。

2.2 TEM 实验

本文使用型号为 JEM-2010 的 TEM 系统对样品开展实验测量。该系统具有约 0.2nm 的点分辨率和约 0.1 nm 的线分辨率,可以在 80~200kV 的加速电压下工作,本实验的加速电压为 200kV。实验过程中,首先在低倍镜下对样品进行粗定位,在应变硅层界面附近寻找适合 TEM 分析的可测区域;然后,逐级放大,在系统的低放大倍数下观测材料的微观结构,找到样品结构的各分界面区域后,在系统的高放大倍数下观测材料的纳观(晶格)结构,采集获得晶格图像。根据 TEM 系统的放大倍数及空间分辨率,可以获得十纳米量级的晶格图像,经过处理得到的 bmp 格式栅线图的像素尺寸为 512×512 。所以,本文基于栅线图像的逻辑运算得出的平均应变的空间分辨率为十纳米量级。

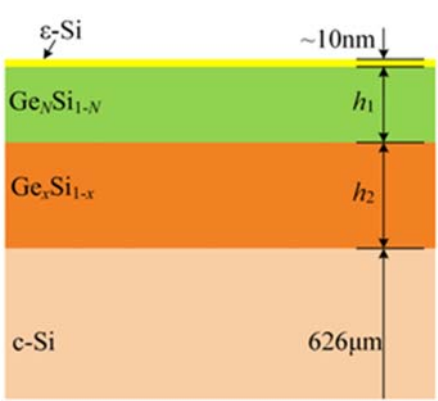


图 5 多层异质半导体材料的结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of the multi-layer semiconductor heterostructure

3 实验结果分析与验证

3.1 验证实验

首先通过模拟实验验证本文提出的基于透射电镜晶格图像的数字云纹应变测量方法的正确性。任取晶体硅的 TEM 晶格图像并确定其直角坐标系以及 g_1 , g_2 与 g_3 ,如图 6 所示。对图 6 的晶格图像沿 Y 方向拉伸,使其图像像素由 512×512 变为 512×522 ,获得 $\epsilon_y=(522-512)\times 100\%/512=1.953\%$ 。

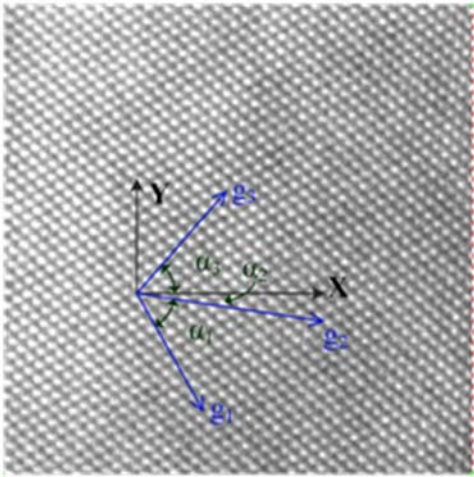


图 6 验证实验中 TEM 图像的坐标示意图
Fig. 6 Coordinate diagram of TEM image in verification experiment

表 2 验证实验的数字云纹计算结果
Tab. 2 Results of digital Moiré for the verification experiments

验证实验		g_1	g_2	g_3
单向拉伸	θ	0.465°	0.113°	0.539°
	ϕ	29.076°	83.562°	47.928°
	ϵ	1.456%	-0.022%	1.038%
刚体转动	θ	1°	1°	1°
	ϕ	88.89°	89.10°	89.01°
	ϵ	0.015%	0.015%	0.015%

在拉伸的图像上重新截取 512×512 像素的图像并将其作为试件栅,将未拉伸的图像作为参考栅。开展如流程图 4 给出的图像分析,量化测得 g_1 , g_2 与 g_3 数字云纹图中的条纹倾角 ϕ 与栅线转角 θ ,代入式(4)得到相应的线应变,如表 2。利用式(5)即可得到平面内三个应变分量为: $\epsilon_x=-0.046\%$, $\epsilon_y=1.915\%$, $\gamma_{xy}=0.007\%$ 。模拟实验中,图像分析结果与理论预期基本一致,其中 ϵ_y 误差 1.95%,验证了

本文提出的应变测量方法的正确性。在此基础上,为了排除试件栅刚体转动的影响,本文对图 6 的图形顺时针转动 1° ,然后与参考栅进行逻辑运算,得出条纹倾角及线应变如表 2,则面内应变的三个分量为: $\epsilon_x = -0.013\%$, $\epsilon_y = 0.029\%$, $\gamma_{xy} = 0.010\%$,三者均接近于零,与事实相符。

3.2 硅基多层异质半导体材料的 TEM 图像分析

图 7 给出了硅基多层异质半导体材料样品的高分辨 TEM 图像。图中,(a)与(b)分别取自于材料一 ϵ -Si 层附近与成分固定缓冲层内部;(c)与(d)分别取自于材料二的固定缓冲层内部与基底 c -Si 层内部。截取图中 A~E 五个代表性区域,其中,A、B、C 区域出自于同一样品,A 区域处于 ϵ -Si 层以内,依据材料制备的原理以及表面样品的紫外拉曼测量结果^[19],能够得出其应变状态为: $\epsilon_x = 1.260\%$, $\epsilon_y = -0.351\%$, $\gamma_{xy} = 0$,其中以界面法向即 $[001]$ 方向为 Y 轴(以下同)。以 A 区域为参考栅,以 B 为试件栅,应用本文提出的方法进行分析计算应变。图 8 给出了拟合得到的三个方向 TEM 栅图像中各栅线的倾角数据,计算平均值并得到试件栅与参考栅之间的栅线转角 θ 。图 9 给出了 A 与 B 的 TEM 栅逻辑运算得到的数字云纹图像,从中量取条纹倾角 ϕ 。为了提高条纹倾角计量的精度,本文在原始图像中等步长平移截取 A 区获得相移的参考栅,再分别与 B 区图像进行逻辑运算获得多幅数字云纹图像,取各自条纹倾角 ϕ 获得其平均值。代入式(4)得到相应的线应变,如表 3。利用式(5)即可得到 B 区相对于 A 区的各应变分量为: $\epsilon_{x\ B/A} = 0.107\%$, $\epsilon_{y\ B/A} = 1.289\%$, $\gamma_{xy\ B/A} = -0.116\%$ 。根据 A 区的实际应变状态,得出 B 区的绝对应变为: $\epsilon_x = 1.367\%$, $\epsilon_y = 0.938\%$, $\gamma_{xy} = -0.116\%$ 。同理,以 A 区域为参考栅,以 C 为试件栅,测量并计算出栅线转角 θ 、条纹倾角 ϕ 。线应变数据如表 3,得到 C 区域的绝对应变为: $\epsilon_x = 1.275\%$, $\epsilon_y = 0.767\%$, $\gamma_{xy} = 1.165\%$ 。

以材料二 c -Si 层中的 E 区图像为参考栅,以 D 区域为试件栅,经过上述处理求取各方向上的参数如表 3 所示,忽略 E 区因整体翘曲导致的细微应变,得出 D 区的应变状态为: $\epsilon_x = 1.393\%$, $\epsilon_y = 1.092\%$, $\gamma_{xy} = -0.365\%$ 。

表 3 多层异质半导体材料的数字云纹计算结果

Tab. 3 Results of digital Moiré for the multi-layer semiconductor heterostructures

应用实验		g_1	g_2	g_3
B	θ	0.934°	0.041°	0.387°
	ϕ	74.6°	3.0°	50.2°
	ϵ	0.454%	1.289%	0.564%
C	θ	0.229°	0.056°	0.718°
	ϕ	23.1°	3.5°	83.4°
	ϵ	0.942%	1.117%	0.161%
D	θ	0.370°	0.240°	0.088°
	ϕ	30.2°	21.3°	6.3°
	ϵ	1.118%	1.092%	1.463%

3.3 结果讨论与对比分析

将采用本文提出的数字云纹计算得出的应变与已有工作中针对同一材料的显微拉曼结果^[19,20]进行对比,二者给出的界面方向应变结果基本一致,但不同之处有二:其一,显微拉曼每个测点的数据实际是约 $1.2\mu\text{m}$ 直径采样点内的平均结果,测量的空间分辨率为微米量级;而本文给出的是(如图 7)边长为 12.7nm 的正方形的平均结果,即测量应变的空间分辨率为 12.7nm 。其二,现有的背散射拉曼测量结果通常需要基于被测点处于单向或者等双轴应力状态的假设,而本文方法则能够直接给出测点的应变状态。

以上实验均是针对硅基材料的高分辨 TEM 图像开展的验证与应用,但就其测试原理而言,本文所提出的方法适用于大多数具有完整、规律性结构的晶体材料,给出的是在 TEM 晶格图像上所截取的空

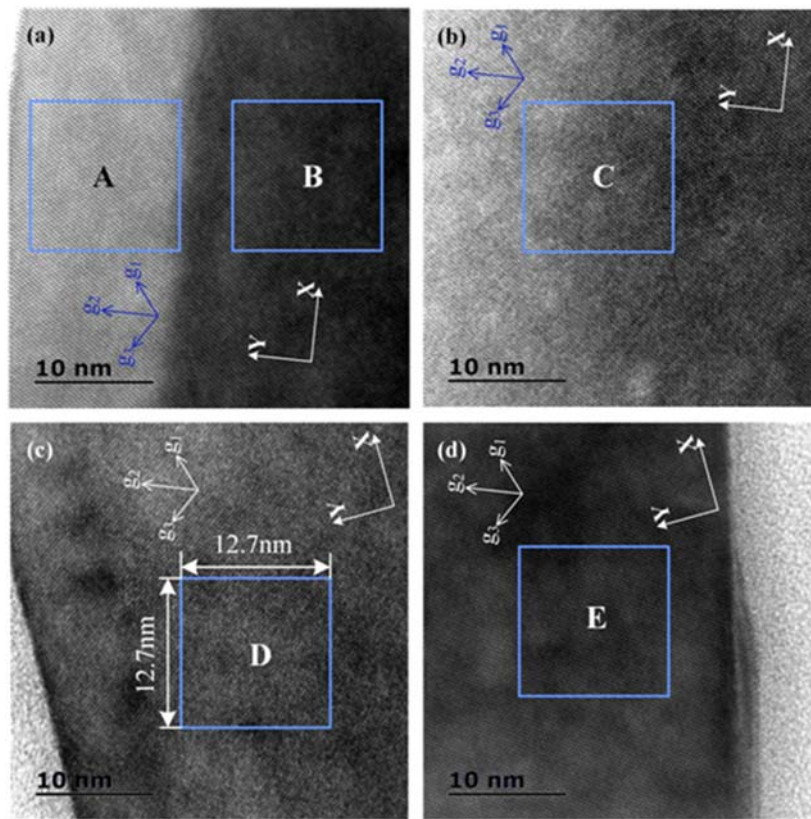


图7 多层异质半导体材料的高分辨 TEM 图像 (a) 材料一 ϵ -Si 层与 $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ 层; (b) 材料一 $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ 层内部; (c) 材料二 $\text{Ge}_{0.2}\text{Si}_{0.8}$ 层内部靠近 ϵ -Si 界面; (d) 材料二 c -Si 基底内部

Fig. 7 High-resolution TEM images of the multi-layer semiconductor heterostructures (a) near the ϵ -Si layer of specimen 1; (b) inside the $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ layer of specimen 1; (c) inside the $\text{Ge}_{0.2}\text{Si}_{0.8}$ layer and near the interface with ϵ -Si layer of specimen 2; (d) inside the c -Si substrate of specimen 2

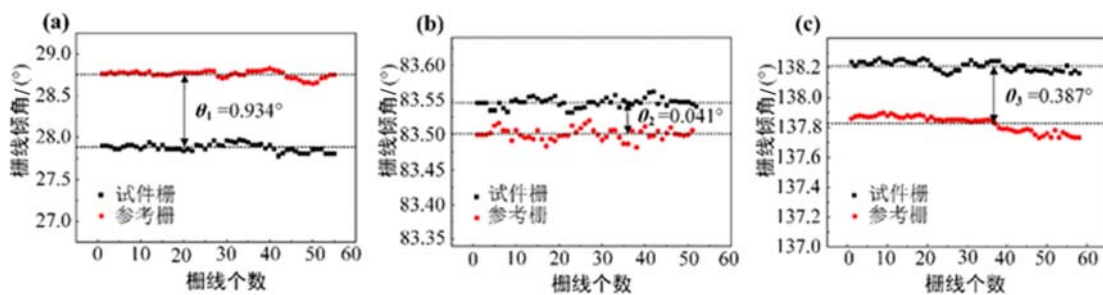


图8 B 区位置试件栅与参考栅所有栅线的倾角 (a) g_1 方向; (b) g_2 方向; (c) g_3 方向

Fig. 8 The inclination angle of all the gratings at B in (a) g_1 , (b) g_2 and (c) g_3 directions

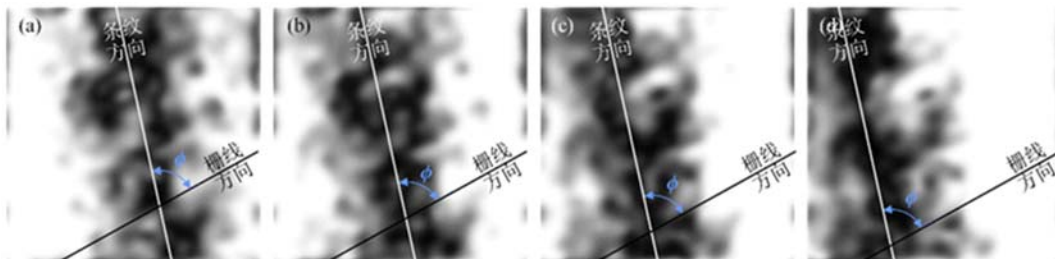


图9 B 区位置 g_1 方向的四步相移数字云纹图

Fig. 9 Digital Moiré images with four-step phase shift at area B in g_1 direction

间范围内的平均、相对应应变信息,并能够给出该位置上应变状态的面内分量细节信息。在此基础上,本文所提出的方法仅需晶格图像充分清晰即可,其空间分辨率取决于所截取 TEM 晶格图像的物理分辨率与图像像素尺寸。尽管二者因系统、试样的差异性而并不固定,但从量级角度而言,本文所提出方法的空间分辨率限于十纳米量级。

4 结 论

本文提出了一种基于高分辨透射电镜晶格图像的数字云纹应变测量方法。该方法首先通过对晶格图像进行傅里叶变换-反傅里叶变换,获得一组三个不同方向的 TEM 栅线图。以已知应变状态位置获取的 TEM 栅为参考栅,以所需测量位置获得的 TEM 栅为试件栅,分别对倾角接近的参考栅与试件栅进行逻辑运算,得到各倾角栅对应的数字云纹图像。计量栅线转角与条纹倾角,利用几何转角云纹原理与应变花公式,求得所测位置的面内应变各分量。本文所提出的应变测量方法,具有十纳米量级的空间分辨率。通过模拟实验验证以及在多层异质半导体材料上的应用实验,验证了该方法的正确性与实用性。

参考文献:

- [1] Kang Y, Qiu Y, Lei Z, et al. An application of Raman spectroscopy on the measurement of residual stress in porous silicon[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2005, 43(8):847—855.
- [2] Qiu W, Kang Y L. Mechanical behavior study of microdevice and nanomaterials by Raman spectroscopy: a review [J]. *Science Bulletin*, 2014, 59(23): 2811—2824.
- [3] Dai F L, Xing Y M. Nano-moiré method[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 15(3):283—288.
- [4] 邢永明. 纳米云纹技术及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2000 (XING Yongming. Nano-moiré technique and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000 (in Chinese))
- [5] 刘战伟, 谢惠民, 方岱宁, 等. 纳米云纹法条纹倍增技术研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(9):1431—1433 (LIU Zhanwei, XIE Huimin, FANG Daining, et al. A study on the multiplication technique of nano-moiré fringe[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9):1431—1433 (in Chinese))
- [6] 谢惠民, 赵兵, 戴福隆, 等. 纳米云纹法实验研究[J]. *光学技术*, 2000, 26(3):193—195 (XIE Huimin, ZHAO Bing, DAI Fulong, et al. Experimental study on nanometer moiré method[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(3): 193—195 (in Chinese))
- [7] 赵春旺. 位错与微裂纹的纳观实验力学研究[D]. 内蒙古工业大学, 2007 (ZHAO Chunwang. Nano-experimental mechanics study on dislocation and micro-crack[D]. Inner Mongolia University of Technology, 2007 (in Chinese))
- [8] Zhao C W, Xing Y M, et al. Quantitative measurement of displacement and strain by the numerical Moiré method [J]. 2008, 6(3):179—182.
- [9] 白朴存, 代雄杰, 赵春旺, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料的界面结构特征[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(1):88—93 (BAI Pucun, DAI Xiongjie, ZHAO Chunwang, et al. Structural features of the interfaces within $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(1):88—93 (in Chinese))
- [10] Hytch M, Houdellier F, Hue F, et al. Nanoscale holographic interferometry for strain measurements in electronic devices[J]. *Nature*, 2008, 453(7198):1086—1089.
- [11] Asundi A, Yung K H. Logical Moiré and its application[J]. *Experimental Mechanics*, 1991, 31(3):236—242.
- [12] Asundi A, Yung K H. Phase-shifting and logical Moiré[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(8):1591—1600.
- [13] Asundi A, Yung K H. Shadow Moiré using LCD projection panel[J]. *Experimental Techniques*, 2010, 15(1):44—48.
- [14] 谭晓华, 仇巍, 李晓雷, 等. 软材料接触力学问题的实验研究[J]. *实验力学*, 2010, 25(5):509—515 (TAN Xiaohua, QIU Wei, LI Xiaolei, et al. Experimental analysis of mechanics problem within soft material contact field in large deformation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(5):509—515 (in Chinese))
- [15] 李晓雷, 亢一澜, 刘波, 等. 用数字圆栅技术研究橡胶类材料 I 型断裂问题[J]. *实验力学*, 2007, 22(3): 191—197 (LI Xiaolei, KANG Yilan, LIU Bo, et al. Application of the digital Moiré technique with circular and radial

- gratings in fracture analysis of rubber-like materials[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(3): 191—197 (in Chinese))
- [16] 肖霞, 亢一澜, 邓卫林, 等. 仿生皮肤软材料大变形场的数字云纹实验[J]. *实验力学*, 2013, 28(1): 1—9 (XIAO Xia, KANG Yilan, DENG Weilin, et al. Digital Moiré measurement of large deformation field for bionic skin soft material[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(1): 1—9 (in Chinese))
- [17] 李晓雷. 数字云纹法及其在大变形测量中的应用[D]. 天津大学, 2006 (LI Xiaolei. Digital moiré method and its application in large deformation measurement[D]. Tianjin University, 2006 (in Chinese))
- [18] 王朝阳. 微米云纹法及其相关的超高频制栅数字化图像处理技术[D]. 北京: 清华大学, 1999 (WANG Zhaoyang. Micron moiré method and its correlative techniques of ultrahigh frequency grating fabrication and digital image processing[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999 (in Chinese))
- [19] 马路路, 程翠丽, 雷振坤, 等. 锗硅缓冲双轴应变硅材料 $\epsilon\text{-Si}/\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{c-Si}$ 内部残余应力的显微拉曼实验分析[J]. *实验力学*, 2016, 31(3): 306—314 (MA Lulu, CHENG Cuili, LEI Zhenkuan, et al. Experimental analysis for residual stress inside biaxial strained silicon material with germanium silicon buffers ($\epsilon\text{-Si}/\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{c-Si}$) by using Micro-Raman[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(3): 306—314 (in Chinese))
- [20] Qiu W, Cheng C L, Liang R R, et al. Measurement of residual stress in a multi-layer semiconductor heterostructure by micro-Raman spectroscopy[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, 32(5): 1—8.

Strain measurement method based on digital Moiré of transmission electron microscope lattice image

GAO Zhi-xun¹, MA Lu-lu¹, XING Hua-dan¹, ZHAO Yu-cheng¹, QIU Wei^{1,2}

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin 300350, China)

Abstract: Through quantifying geometric rotation angle, a new strain measurement method is presented in this paper based on digital Moiré. This method is based on lattice images obtained by high-resolution transmission electron microscope (TEM). Through Fourier transform and inverse Fourier transform, TEM lattice images are generated into three grid diagrams with different inclination angles. Taking TEM grating image obtained from the known strain state position as the reference grating image and taking grating image obtained from the required measuring position as the specimen grating image, the logical operation of specimen grating image with the inclination angle approaching that of the reference grating image are carried out, respectively, and digital Moiré images corresponding to each inclination angle grating image are obtained. Based on the principle of geometric Moiré, an analytical relationship between the angle increment of the grating inclination (viz. grating rotation angle), θ , the fringe inclination angle, ϕ , and the normal strain of the grating, ϵ , was established. By quantify the θ and ϕ in the digital Moiré images and the grating images, the normal strains along the three inclination angles of the gratings was detected, hence all of the in-plane strain components were acquired. The proposed method obtains the average strain of the high-resolution TEM image, hence it has a spatial resolution in ten nanometer magnitude. In this work, verification experiments were preformed, proved the correctness of the above method. Then, it was applied to analyzed the strain inside the multi-layer semiconductor heterostructure, achieving the detail information of the in-plane strain components.

Keywords: lattice images; high resolution transmission electron microscopy (TEM); digital Moiré; strain measurement; grating rotation angle; fringe inclination angle