

基于水平集方法的离子束刻蚀碲镉汞的轮廓演变模拟

刘向阳^{1,2*}, 徐国庆¹, 贾嘉¹, 孙艳³, 李向阳¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中科院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 用水平集方法建立了碲镉汞的离子束刻蚀轮廓的数值模型。模型的输入参数包括掩膜厚度、掩膜侧壁倾角、掩膜沟槽宽度、离子束散角、刻蚀速度等参数。对碲镉汞的刻蚀轮廓和刻蚀速度减缓现象进行了模拟和实验验证, 结果表明, 在沟槽宽度为 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 的范围内, 计算得到的刻蚀深度和 SEM 测量结果相差 $6 \sim 20\%$ 。对掩膜的轮廓演变进行了模拟, 给出了一个优化设计掩膜厚度来提高深宽比的实例。

关键词: 碲镉汞; 离子束; 刻蚀轮廓; 水平集方法; 刻蚀速度减缓; 深宽比

中图分类号: TN215 文献标识码: A

Simulation of profile evolution in HgCdTe ion beam etching by the level set method

LIU Xiang-Yang^{1,2*}, XU Guo-Qing¹, JIA Jia¹, SUN Yan³, LI Xiang-Yang¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A numerical model was established by the level set method to simulate the etching profile evolution in HgCdTe ion beam etching. The input parameters are: mask thickness, the slope of mask sidewall, trench width, ion angular distributions, etching speed, et al. Etching lag and etching profile of HgCdTe were simulated and compared with the experimental results. The results show that, given nominal trench width $4 \sim 10 \mu\text{m}$, the errors between simulated etch depths and that of the experiments are $6 \sim 20\%$. The profile evolution of etching mask was simulated and an example was given to illustrate how to design the mask thickness to improve the aspect ratio.

Key words: HgCdTe, ion beam, etching profile, the level set method, etch lag, aspect ratio

PACS: 07.57.Kp

引言

碲镉汞材料是制做红外焦平面探测器的首要材料, 而离子束刻蚀工艺是制备红外光导探测器^[1]、环孔型红外光伏探测器^[2,3]的重要工艺之一。由于禁带比较窄, 碲镉汞容易受到刻蚀引起的晶格损伤

的影响。为了降低晶格损伤, 离子能量应当尽量小。另一方面, 为了使光敏元面积最大化, 又要求刻蚀沟槽尽量窄, 在材料厚度一定的情况下, 这意味着刻蚀轮廓应具有较高的深宽比。在实际刻蚀工艺制订过程中要兼顾二者, 即在离子能量较小的情况下, 寻找刻蚀深宽比较高的工艺参数。

收稿日期: 2018-01-23 修回日期: 2018-04-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0500600)

Foundation items: National Key Research and Development Program of China(2016YFB0500600)

作者简介(Biography): 刘向阳(1978-)男, 河北满城人, 副研究员, 博士研究生, 主要研究领域是红外探测器和紫外探测器的等离子体干法刻蚀工艺。E-mail: liuxytry@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: liuxytry@126.com

Received date: 2018-01-23 **revised date:** 2018-04-19

通常需要进行一系列正交实验来建立刻蚀工艺参数和刻蚀轮廓的关系,比如光刻胶厚度和侧壁倾角、线宽、工作台倾角、离子能量和刻蚀轮廓、刻蚀速度之间的定量关系.然而,开展以上实验需要投入一定的时间和费用.模拟方法可以快速地获得大量的计算结果,甚至能够采用实验方法中难以实现的参数组合进行模拟计算,因此模拟方法是实验方法的必要补充.

碲镉汞材料的刻蚀深宽比受到刻蚀速度减缓现象(Etch lag)^[4,5]的影响,这种现象是指当线宽变窄时,刻蚀速度会变慢.这种现象对生产实践的不良影响,一方面在于降低了工作效率,另一方面,这种变慢的刻蚀速度目前缺乏解析表达式来描述,工艺人员难以确定刻蚀深度,从而降低了产品合格率.Stolz^[5]等人使用了经验公式来描述刻蚀速度减缓现象,然而其所用的经验公式来源于对硅材料刻蚀轮廓的数值模拟,而且只考虑了等离子体中离子束散角对刻蚀轮廓的影响,没有考虑掩膜厚度和掩膜侧壁倾角的影响,难以应用到生产实际当中.本文用水平集方法对碲镉汞材料的刻蚀轮廓建立了数值模型,并对刻蚀轮廓和影响刻蚀深宽比的刻蚀速度减缓现象进行计算和实验验证.该模型可以用来节省碲镉汞的离子束刻蚀工艺开发时间和费用,为红外探测器的版图设计提供参考.

掩膜在刻蚀过程中会出现小刻面(Faceting)现象^[6],这种现象是指在特定的离子入射角度,掩膜上出现刻蚀速度的极大值,经过一定刻蚀时间之后,位于掩膜侧壁顶部的侧壁倾角变小,形成小刻面.当小刻面从掩膜侧壁的顶部延伸到掩膜侧壁的底部时,掩膜侧壁后退的速度增大,从而增大了线宽损失.做为以上数值模型的应用,通过模拟掩膜刻蚀轮廓的演变可以对小刻面的形成和发展进行预测,从而便于对掩膜厚度进行优化设计.

1 模型

等离子体刻蚀轮廓模拟方法主要有,弦法^[7]、特征曲线法^[8]、蒙特卡洛法^[9]、水平集方法^[10-13]和元胞法等.弦法和特征曲线法需要对界面前进过程中产生的环进行去环操作,比较繁琐而且容易引入人为误差.蒙特卡洛方法和元胞法对计算机性能要求较高,且计算时间较长.水平集方法相对于前几种方法,既能保证一定的精度又能在较短的时间内得出结果,是一种较为简便快捷的工具^[14].水平集方法由 Osher 和 Sethian 提出^[15],用于解决枝晶生长、

火焰燃烧等界面演变问题,这种方法通过增加界面上未知量维度的方式来隐式表达界面,避免了对复杂界面给出显式表达式带来的不便.水平集方法中未知量的初始值由符号距离函数定义,随着时间的变化,函数值也发生相应的变化,函数值为 0 的坐标点的集合重新构成新的界面.

现对模型介绍如下,图 1 是离子束刻蚀沟槽的示意图,沟槽的开口宽度为 W_e ,沟槽的底部宽度为 W_b ,沟槽深度为 H ,刻蚀沟槽的深宽比 AR 定义为: H/W_e .点 P 为刻蚀界面上的某个点.

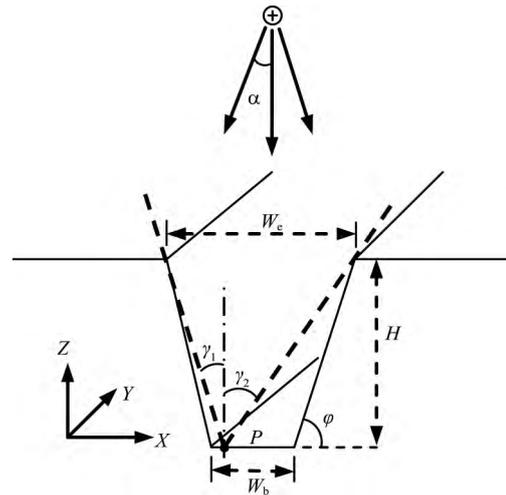


图 1 离子束刻蚀沟槽的示意图

Fig. 1 Schematic of ion beam etching of trench

刻蚀界面的 Hamilton-Jacobi 方程是,

$$\phi_t + H(\nabla\phi(t, X)) = 0 \quad (1)$$

其中,

$$H(\nabla\phi(t, X)) = V(t, X) |\nabla\phi(t, X)| \quad (2)$$

X 是界面上某点 P 的坐标, $V(t, X)$ 是界面的速度函数. ϕ 是点 (x, y) 处的函数值,其初始值由符号距离函数给出,即 $\phi(0, x, y) = \pm d$ 为点 (x, y) 到界面的最短距离.

为了处理在界面上法向导数变化大的坐标点,需要采用 Lax-Friedrichs 空间离散格式,时间离散采用 Runge-Kutta 法. Lax-Friedrichs 空间离散格式^[14]为:

$$\phi_{ij}^{n+1} = \phi_{ij}^n - \Delta t \left[H \left(\frac{D_{ij}^{-x} + D_{ij}^{+x}}{2}, \frac{D_{ij}^{-y} + D_{ij}^{+y}}{2} \right) - \frac{1}{2} \alpha_x (D_{ij}^{+x} - D_{ij}^{-x}) - \frac{1}{2} \alpha_y (D_{ij}^{+y} - D_{ij}^{-y}) \right] \quad (3)$$

其中,

$$D_{ij}^{+x} = \frac{\phi_{i+1j}^n - \phi_{ij}^n}{\Delta x}, D_{ij}^{-x} = \frac{\phi_{ij}^n - \phi_{i-1j}^n}{\Delta x}, \quad (4)$$

$$\alpha_x = \max \left| \frac{\partial H}{\partial \phi_x} \right|, \alpha_y = \max \left| \frac{\partial H}{\partial \phi_y} \right|. \quad (5)$$

刻蚀界面上的点 P 除了受到直接来自于离子源的离子轰击, 还会受到射向刻蚀界面侧壁上某点 B 并反射至点 P 的离子的轰击. 因此, 刻蚀轮廓的刻蚀速度 (6) 由以上两部分组成:

$$V(t, X) = ER(\theta)\Gamma_{shadow} + ER(\pi - 2\psi - \theta)\Gamma_{reflection} \quad (6)$$

其中,

$$\sin\theta = \frac{\phi_x}{|\nabla\phi|} \quad (7)$$

Γ_{shadow} 是点 P 处的直接来自于离子源的离子通量, $\Gamma_{reflection}$ 是点 P 接受的来自于刻蚀侧壁上某点 B 的反射离子通量. 入射角度 θ 和 ψ 分别是界面上某点 P 和 B 处的法向矢量 \vec{n}_1, \vec{n}_2 和 Z 轴方向矢量 \vec{z} 之间的夹角, 如图 2 所示. $ER(\theta)$ 是被刻蚀材料被具有离子能量 E 、离子通量 Γ 和入射角度 θ 的离子束轰击后的刻蚀速度.

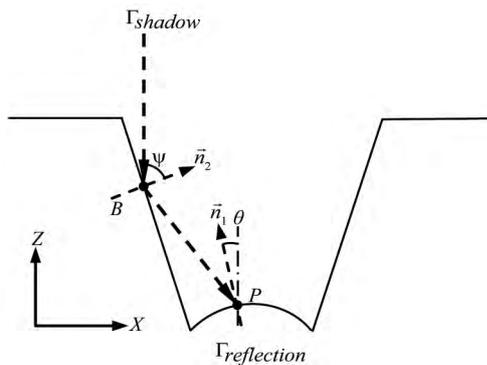


图 2 反射离子通量的示意图

Fig. 2 Schematic of ion beam reflection flux

受离子阴影效应影响, 点 P 处接受的直接来自于离子源的离子通量 Γ_{shadow} 由以下公式^[16]来定义:

$$\Gamma_{shadow} = \Gamma_{i0} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \left(\sqrt{\frac{R}{\pi}} \sec\gamma \exp(R - R\sec^2\gamma) + \frac{\exp(R)}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{R} \sec\gamma) \right) \cos(\gamma - \theta) d\gamma \quad (8)$$

Γ_{i0} 为无掩膜时的离子通量, γ 为点 P 处向掩膜开口处望去的视角, γ_1 为负值, γ_2 为正值, 如图 1 所示. 在文献^[16]中, $R = eV_s/kT_i$, 其中 V_s 是指刻蚀直流偏置电压, T_i 是指横向离子温度, 然而在本实验装

置中无法测量离子温度 T_i , 因此对参数 R 进行了重新定义, 用离子束刻蚀工艺参数: 离子束散角 α 来表达, 定义为:

$$R = \cotan(\alpha) \quad (9)$$

点 P 处接受到的反射离子通量 $\Gamma_{reflection}$ 可表示为^[17]:

$$\Gamma_{reflection} = \frac{\Gamma_{shadow}(\psi - \psi_m)}{\frac{\pi}{2} - \psi_m}; \psi > \psi_m, \quad (10)$$

当点 B 的入射角 ψ 小于 ψ_m 时, 假设反射离子通量为 0. 值得说明的是, 公式 (10) 中 Γ_{shadow} 是指点 B 处的离子通量, 而非点 P 处的离子通量.

数值模型用到的假设: 假设沟槽的 Y 方向为无限长; 由于离子束刻蚀时的压强足够低, 忽略再沉积现象^[18].

对方程组 (1) ~ (10) 进行数值求解, 即得到刻蚀轮廓随时间的变化.

2 实验

为了解模拟的效果, 对不同 x 组分的碲镉汞材料在不同工艺参数下的刻蚀轮廓进行了数值模拟和实验验证. 实验中用到的碲镉汞材料是用碲溶剂区熔法生长的多晶体材料, 掩膜采用 AZ4330 光刻胶. 刻蚀实验的 3 种不同的工艺参数见表 1. 模拟所需要的参数如离子束散角 α , 刻蚀前掩膜的实际厚度 H , 光刻胶沟槽底部宽度 W_b 和侧壁倾角 φ , 被刻蚀材料的刻蚀速度 $ER(\theta)$, 必须通过实验测量的方法来获得.

表 1 离子束刻蚀工艺参数

Table 1 The process parameters of ion beam etching experiment

Parameter	Working Cond. A	Working Cond. B	Working Cond. C
离子能量 (eV)	150	300	500
束流密度 (mA/cm ²)	0.12	0.35	0.77
离子束流 (mA)	30	55	103

2.1 离子束散角的测量

入射离子的束散角和公式 (8) 中参数 R 的大小密切相关, 它通过离子阴影效应影响刻蚀轮廓的深宽比. 用法拉第探头对离子能量为分别 150 eV、300 eV、500 eV 的离子束散角 α 进行了测量. 离子束刻蚀设备是北京埃德万斯离子束研究所生产的 LKJ-1C-400 型离子束刻蚀机, 刻蚀设备的腔体尺寸为 $30 \times 30 \times 35 \text{ cm}^3$, 分子泵转速为 350 Hz, 本底真空度为 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 工作气体为氦气, 工作状态的真空度为

2×10^{-2} Pa, 离子束入射角度(相对于工作台面法线方向)为 0° , 工作台温度为 8°C . 离子源是三栅考夫曼离子源, 离子源直径 10 cm, 法拉第探头所在的平面位于离子源下边缘下方 12.5 cm 处, 测量时使探头在该平面上从离子源轴心处向外水平移动, 可以获得离子束流密度在该平面上的径向分布, 测量结果见图 3. 由文献 [19] 中的计算方法可知, 3 种离子能量的离子束散角 α 均为 13° .

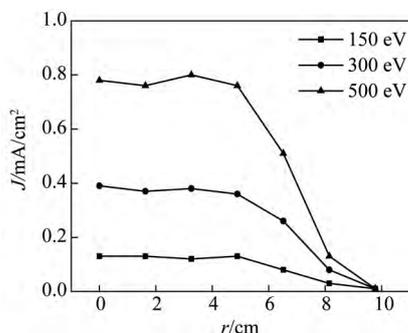


图 3 离子束流密度的径向分布
Fig. 3 The radial distribution of ion current density

2.2 刻蚀速度曲线

改变工作台的倾角, 对不同离子束入射角度情况下 AZ4330 光刻胶的刻蚀速度进行测量和拟合, 得到以下刻蚀速度曲线:

$$ER_{mask}(\theta) = V_{mask} (1 + 27.4 \sin^2 \theta - 199.5 \sin^3 \theta + 548.6 \sin^4 \theta - 620.8 \sin^5 \theta + 249 \sin^6 \theta) \cos \theta \quad (11)$$

用同样的方式对碲镉汞材料的刻蚀速度曲线进行了实验测量, 其刻蚀速度曲线公式可近似为:

$$ER_{\text{HgCdTe}}(\theta) = V_{\text{HgCdTe}} \cos \theta \quad (12)$$

当刻蚀工艺条件不变时, 公式 (11)、(12) 中的 V_{mask} 、 V_{HgCdTe} 是和材料相关的常数.

2.3 不同 x 组分刻蚀样品的刻蚀实验

对具有不同 x 组分的 5 片碲镉汞样品进行了离子束刻蚀实验, 材料组分、刻蚀速度、所用的刻蚀条件和刻蚀时间 t_1 、 t_2 见表 2. 5 片碲镉汞样品均采用 AZ4330 光刻胶做掩膜, 掩膜的名义沟槽宽度为 4、6、8、10 μm . 经 SEM 测量发现, 掩膜在刻蚀前的侧壁倾角 φ 为 74° , 掩膜底部的实际沟槽宽度 W_b 分别约为 4.5 μm 、7.5 μm 、9.5 μm 、11.5 μm , 掩膜厚度 H 为 3.6 μm . 刻蚀后的样品经解理后, 用扫描电子显微镜得到了 5 片样品横截面的刻蚀轮廓图像.

2.4 数值实验

基于水平集方法的反应离子刻蚀轮廓模拟软件

表 2 离子束刻蚀实验中的参数

Table 2 The parameters of ion beam etching experiment

NO.	x	V_{mask} ($\mu\text{m}/\text{hour}$)	V_{HgCdTe} ($\mu\text{m}/\text{hour}$)	Working Cond.	t_1 (min)	t_2 (min)
1	0.23	0.47	11.3	B	60	90
2	0.39	0.47	7.3	B	60	69
3	0.45	0.47	8.37	B	60	69
4	0.27	0.11	2.65	A	300	480
5	0.35	1.30	31.5	C	30	45

有 SPEEDIE^[11], SPELS^[12], SPEED^[13], 然而用于离子束刻蚀轮廓模拟的水平集软件并不多见. 本数值实验所用的程序是在水平集方法软件包 toolboxLS-1.1.1^[20] 的基础上改编而成. 对长度单位进行了归一化处理, 1 个长度单位代表 10 μm , 计算网格划分为 160×160 结点. 对 5 片样品的刻蚀轮廓演变过程进行了数值计算, 输入参数主要有: 离子束散角 α , 刻蚀前掩膜的实际厚度 H , 光刻胶沟槽底部宽度 W_b 和侧壁倾角 φ , 被刻蚀材料的刻蚀速度 $ER(\theta)$ 和刻蚀时间等. 对 2#、3# 样品进行模拟时加入了离子阴影机制和离子反射机制, 并假设公式 (10) 中的临界入射角 ψ_m 为 66° . 为了加快计算速度, 对 1#、4#、5# 样品进行模拟时只加入了离子阴影机制, 不包含离子反射机制.

3 结果和讨论

1# 样品中名义沟槽宽度为 8 μm 的刻蚀轮廓(含光刻胶)如图 4 所示. 为了比较刻蚀轮廓的实验结果和模拟结果, 提取了 SEM 图像中刻蚀轮廓上的一些离散的点, 如图 5 所示.

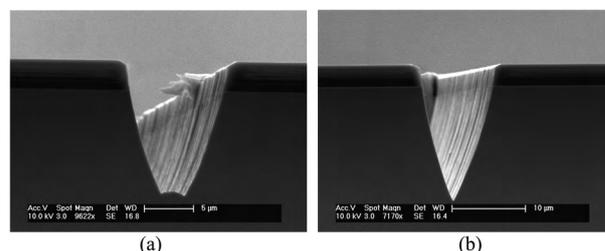


图 4 1# 样品中名义沟槽宽度为 8 μm 的刻蚀轮廓演变:
(a) 1 小时 (b) 1.5 小时
Fig. 4 The profile evolution of 1# sample with 8 μm nominal trench width: (a) 1 hour (b) 1.5 hours

把图 5 中提取的离散点叠加到相应样品的刻蚀轮廓模拟结果上, 可以对模拟结果进行实验验证. 1# 样品中不同名义沟槽宽度的碲镉汞和光刻胶经历了刻蚀时间 t_1 、 t_2 后的实验和模拟结果的比较见图 6. 2#、5# 样品碲镉汞刻蚀轮廓的实验和模拟结果的比较

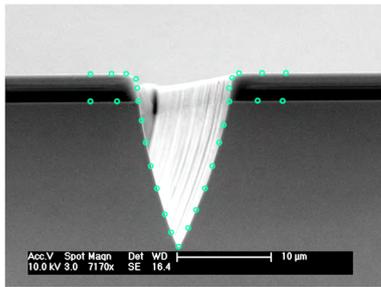


图5 1#样品中名义沟槽宽度为8 μm的刻蚀轮廓的提取 图中绿色圆圈代表在刻蚀轮廓上提取的离散点
Fig.5 The extraction of etching profile of 1# sample with 8 μm nominal trench width from the scanning electron micrograph, the green circles are used to represent discrete points on the etching profile

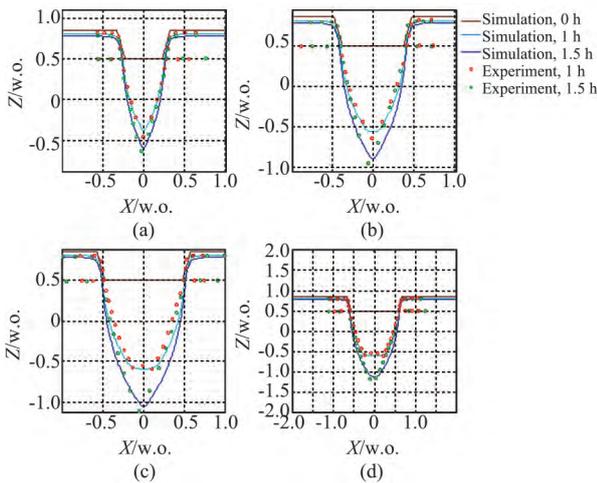


图6 1#样品中不同名义沟槽宽度的碲镉汞及光刻胶刻蚀轮廓的实验结果和计算结果. 轮廓中 $Z > 0.5$ 的部分为掩膜, $Z \leq 0.5$ 的部分为碲镉汞. (a) 4 μm, (b) 6 μm, (c) 8 μm, (d) 10 μm
Fig.6 Comparison between simulated profiles and experimental profiles of 1# sample. On these profiles the zone where $Z > 0.5$ is mask, the zone where $Z \leq 0.5$ is HgCdTe. (a) 4 μm, (b) 6 μm, (c) 8 μm, (d) 10 μm

分别见图7、8. 可见, 在深宽比方面, 实验结果和模拟结果比较符合. 由模拟过程可知, 在碲镉汞的离子阴影效应(8)和刻蚀速度曲线(12)的共同作用下, 碲镉汞刻蚀轮廓大致呈V形. 图9比较了不同名义沟槽宽度的1~5#样品刻蚀深度的模拟结果和实验结果, 二者之间的最大误差分别是6%、20%、12%、12%、10%, 说明该模型总体上对刻蚀速度减缓现象的预测比较准确. 这些刻蚀深度中误差最大的是2#样品在刻蚀1小时后的刻蚀深度, 相差20%. 由图7(b)可见, 该样品的实验轮廓曲线在刻蚀1小时后, 沟槽底部呈现平台状, 而模拟轮廓曲线在沟槽底部呈现V形. 原因可能是, 当沟槽宽度较窄时, 由实

验样品上刻蚀沟槽两侧壁的反射离子分别形成的槽底开沟在此时尚未开始合并, 而模拟程序判断此时二部分槽底开沟已经开始合并, 从而引入了较大的计算误差. 当刻蚀深度较深时, 沟槽底部的离子通量较小, 反射离子通量的比例也相应地减小, 以致可以忽略. 因此, 1#、4#、5#样品的刻蚀深度模拟误差比2#样品的小. 为了使模拟结果更加符合实验结果, 将来可以对离子反射形成的槽底开沟现象开展进一步实验, 建立更精确的模型. 值得一提的是, 以上模拟程序不仅可以用于模拟碲镉汞材料, 如果获得了其它材料的刻蚀速度曲线 $ER(\theta)$, 也可以用于模拟其它材料的刻蚀轮廓.

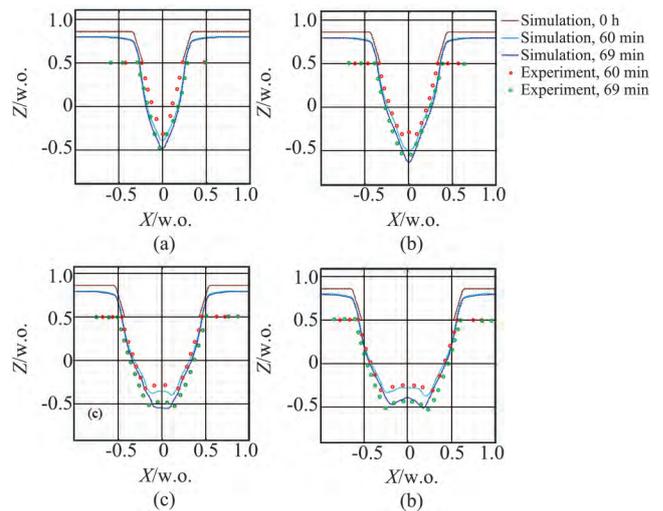


图7 2#样品中不同名义沟槽宽度的碲镉汞刻蚀轮廓的实验结果和计算结果. 轮廓中 $Z > 0.5$ 的部分为掩膜, $Z \leq 0.5$ 的部分为碲镉汞. (a) 4 μm, (b) 6 μm, (c) 8 μm, (d) 10 μm
Fig.7 Comparison between simulated profiles and experimental profiles of 2# sample. On these profiles the zone where $Z > 0.5$ is mask, the zone where $Z \leq 0.5$ is HgCdTe. (a) 4 μm, (b) 6 μm, (c) 8 μm, (d) 10 μm

4 掩膜厚度的优化设计

在长时间刻蚀后, 小刻面现象使光刻胶出现后退, 并使沟槽宽度增加, 增加了线宽损失, 降低了深宽比. 因此, 适当增加掩膜厚度, 避免小刻面到达沟槽底部, 对于控制线宽精度很重要. 做为数值模型的应用实例, 以1#样品为例分析了掩膜厚度对深宽比的影响, 图10是1#样品中名义沟槽宽度为4 μm, 刻蚀时间为4.5小时的碲镉汞轮廓演变的模拟结果, 图10(a)、(b)是掩膜厚度分别为3.6 μm、7.2 μm的情况, 由图10(a)可知, 刻蚀4.5小时后, 尽管掩膜还剩余一定厚度, 然而受小刻面现象的影响, 掩膜的侧壁已经开始加快后退, 而图10(b)的掩膜厚度

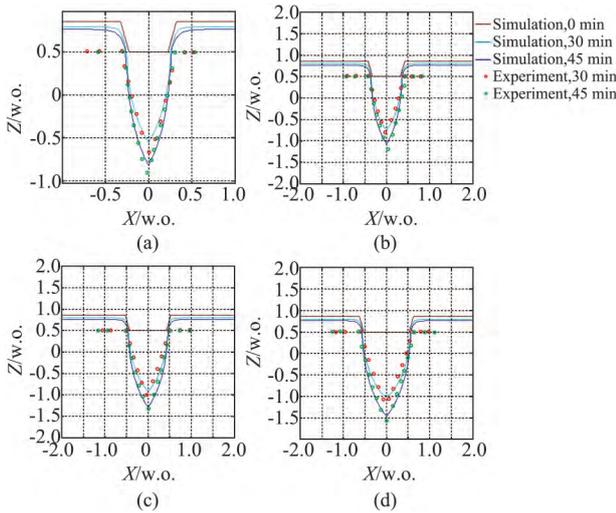


图8 5#样品中不同名义沟槽宽度的碲镉汞刻蚀轮廓的实验结果和计算结果. 轮廓中 $Z > 0.5$ 的部分为掩膜, $Z \leq 0.5$ 的部分为碲镉汞. (a) $4 \mu\text{m}$, (b) $6 \mu\text{m}$, (c) $8 \mu\text{m}$, (d) $10 \mu\text{m}$

Fig. 8 (a) Comparison between simulated profiles and experimental profiles of 5 # sample. On these profiles the zone where $Z > 0.5$ is mask, the zone where $Z \leq 0.5$ is HgCdTe. (a) $4 \mu\text{m}$, (b) $6 \mu\text{m}$, (c) $8 \mu\text{m}$, (d) $10 \mu\text{m}$

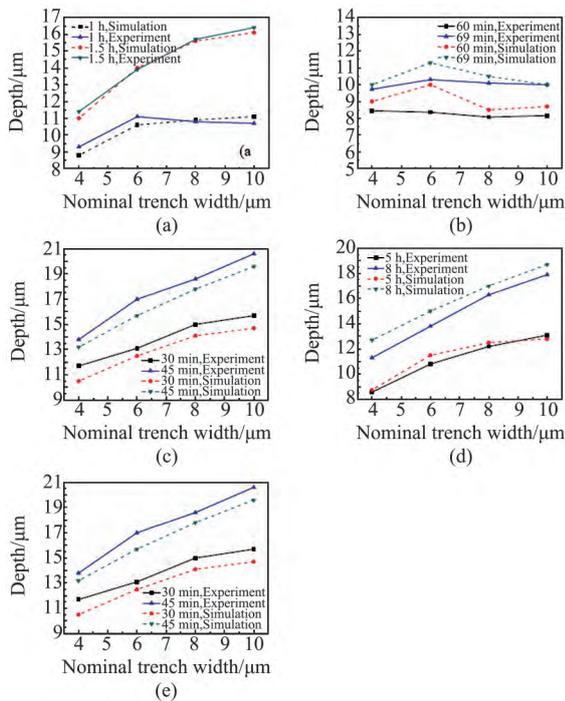


图9 1~5#样品中碲镉汞刻蚀深度的计算结果和实验结果的比较. (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, (d) 4#, (e) 5#

Fig. 9 Comparison of the measured HgCdTe etching depths with the modeling results of samples 1~5 #. (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, (d) 4#, (e) 5#

较厚, 掩膜后退的情况相对较小.

选用不同的掩膜厚度, 对名义沟槽宽度为

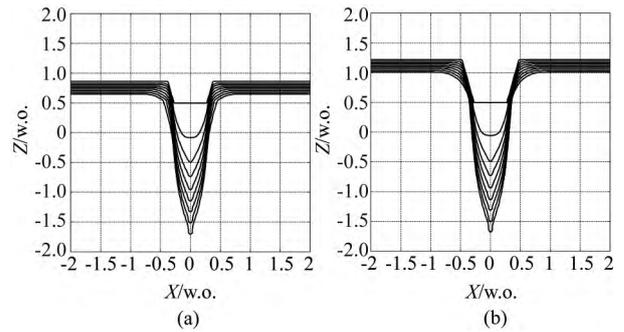


图10 名义沟槽宽度为 $4 \mu\text{m}$ 刻蚀时间为 4.5 小时的碲镉汞轮廓演变的模拟结果. 掩膜厚度: (a) $3.6 \mu\text{m}$, (b) $7.2 \mu\text{m}$. 轮廓中 $Z > 0.5$ 的部分为掩膜, $Z \leq 0.5$ 的部分为碲镉汞

Fig. 10 The profile evolution of photoresist AZ4330 and HgCdTe with $4 \mu\text{m}$ nominal trench width, the etching time is 4.5 hours, the mask thicknesses are: (a) $3.6 \mu\text{m}$, (b) $7.2 \mu\text{m}$. On these profiles, the zone where $Z > 0.5$ is mask, the zone where $Z \leq 0.5$ is HgCdTe

$4 \mu\text{m}$ 刻蚀时间为 4.5 小时的碲镉汞轮廓演变进行模拟计算, 然后将模拟得到深宽比 AR 进行了比较, 结果如图 11 所示. 可见适当增加掩膜厚度可以避免小刻面现象带来的线宽损失. 然而, 过度地增加掩膜厚度会减小进入沟槽底部的离子通量, 减小深宽比. 优化后的掩膜厚度为 $5.4 \mu\text{m}$.

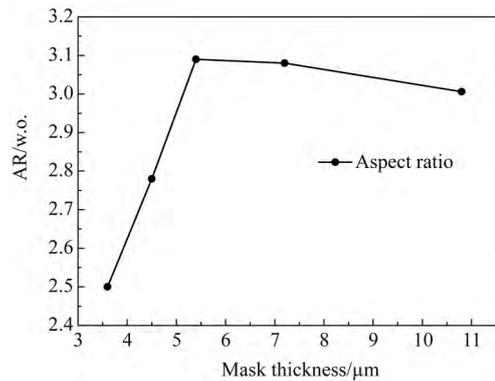


图11 碲镉汞的深宽比随掩膜厚度变化的关系, 名义沟槽宽度为 $4 \mu\text{m}$ 刻蚀时间为 4.5 小时

Fig. 11 The relation between the HgCdTe Aspect Ratio and mask thickness, nominal trench width is $4 \mu\text{m}$, the etching time is 4.5 hours

5 结论

用水平集方法建立了碲镉汞的离子束刻蚀轮廓的数值模型. 和实验结果比较后发现, 在沟槽宽度为 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 的范围内, 计算得到的碲镉汞刻蚀深度和 SEM 测量结果相差为 $6 \sim 20\%$, 说明模型对刻蚀速度减缓现象的预测比较准确, 可以用来节省刻蚀工

艺开发的时间和费用,为红外探测器的版图设计提供参考。在刻蚀速度公式和离子阴影效应的共同作用下,碲镉汞的刻蚀轮廓呈V形。在获得了其它材料的刻蚀速度之后,还可以对其它材料的离子束刻蚀轮廓进行模拟。对掩膜的刻蚀轮廓演变进行了模拟,并给出了一个优化设计掩膜厚度的例子。

References

- [1] JIA Jia, LIU Shi-jia, LIU Xiang-Yang, et al. Improving the aspect ratio of ion beam etched trenches in HgCdTe [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (贾嘉,刘诗嘉,刘向阳,等. 离子束刻蚀碲镉汞的沟槽深宽比改进. 红外与毫米波学报) 2015 **34**(3): 282-285.
- [2] BAKER I M, MAXEY C D. Summary of HgCdTe 2D Array Technology in the U. K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001 **30**(6): 682-689.
- [3] BOGOBOYASHCHYY V V, ELIZAROV A I, IZHNNIN I I. Conversion of conductivity type in Cu-doped Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te crystals under ion beam milling [J]. *Semicond. Sci. Technol.* 2005, **20**: 726-732.
- [4] ZHOU Wen-hong, YE Zhen-hua, XING Wen, et al. The Study on the Profile of HgCdTe Micro-mesa Arrays Isolated by Dry-etch Process [J]. *Laser & Infrared* (周文洪,叶振华,邢雯,等. 碲镉汞深微台面阵列干法隔离的轮廓研究. 激光与红外) 2006 **36**(1): 1029-1031.
- [5] STOLTZ A J, BENSON J D, BOYD P R et al. The Effect of Electron Cyclotron Resonance Plasma Parameters on the Aspect Ratio of Trenches in HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, **32**(7): 692-697.
- [6] LIU Jin-Sheng. Ion beam Technology and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press(刘金声. 离子束技术及应用. 北京: 国防工业出版社), 1995: 267.
- [7] YOUNGNER D W, HAYNES C M. Modeling ion beam milling [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 1982, **21**(2): 677-680.
- [8] ARNOLD J C, SAWIN H H, DALVIE M et al. Simulation of surface topography evolution during plasma etching by the method of characteristics [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 1994, **A12**(3): 620-635.
- [9] BLAUW M A, DRIFT E V, MARCOS G, et al. Modeling of fluorine-based high-density plasma etching of anisotropic silicon trenches with oxygen sidewall passivation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(10): 6311-6318.
- [10] OSHER S, FEDKIW R P. Level Set Methods: An Overview and Some Recent Results [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, **169**: 463-502.
- [11] HSIAU Z K, KAN E C, MCVITTIE J P, et al. Robust, Stable, and Accurate Boundary Movement for Physical Etching and Deposition Simulation [J]. *IEEE on Electron Devices*, 1997, **44**(9): 1375-1385.
- [12] HWANG H H, GOVINDAN T R, MEYYAPPAN M. Feature Profile Evolution Simulation Using a Level Set Method [J]. *J. Electrochem. Soc*, 1999, **146**(5): 1889-1894.
- [13] IM Y H, HAHN Y B, PEARTON S J. Level set approach to simulation of feature profile evolution in a high-density plasma-etching system [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B* 2001, **19**(3): 701-710.
- [14] SETHIAN J A, ADALSTEINSSON D. An Overview of Level Set Methods for Etching, Deposition, and Lithography Development [J]. *IEEE Trans. Semicon. Manufacturing*, 1997, **10**(1): 167-184.
- [15] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, **79**: 12-49.
- [16] TUDA M, NISHIKAWA K, ONO K. Numerical study of the etch anisotropy in low-pressure, high-density plasma etching [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, **81**(2): 960-967.
- [17] SMITH R, TAGG M A, WALLS J M. Deterministic models of ion erosion and redeposition [J]. *Vacuum*. 1984, **34**(1-2): 175-180.
- [18] SAUSSAC J, MARGOT J, CHAKER M. Profile evolution simulator for sputtering and ion-enhanced chemical etching [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 2009, **A27**(1): 130-138.
- [19] ASTON G, KAUFMAN H R, WILBUR P J. Ion beam Divergence Characteristics of Two-Grid Accelerator Systems. *AIAA Journal*, 1978, **16**(5): 516-524.
- [20] MITCHELL I M. A toolbox of level set methods (version 1.1) [M/OL]. Department of Computer Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Tech. Rep. TR-2007-11, June 2007, <http://www.cs.ubc.ca/~mitchell/ToolboxLS/toolboxLS.pdf>.

(上接第314页)

- [5] Kang K, Lin F J, Pham D D, et al. A 60 GHz OOK receiver with an on-chip antenna in 90 nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, **45**(9): 1720-1731.
- [6] D. Neculoiu, A. Muller, K. Tang, et al. 160 GHz on-chip dipole antenna structure in silicon technology [C]. 2007 International Semiconductor Conference, 2007: 245-248.
- [7] Ojefors E, Sonmez E, Chartier S, et al. Monolithic integration of a folded dipole antenna with a 24 GHz receiver in SiGe HBT technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, **55**(7): 1467-1475.
- [8] Hsu S S, Wei K C, Hsu C Y, et al. A 60 GHz millimeter-wave CPW-fed Yagi antenna fabricated by using 0.18- μ m CMOS technology [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, **29**(6): 625-627.
- [9] Seok E, Shim D, Mao C, et al. Progress and challenges towards terahertz CMOS integrated circuits [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, **45**(8): 1554-1564.
- [10] Zhang Y P, Sun M, Guo L H. On-chip antennas for 60 GHz radios in silicon technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, **52**(7): 1664-1668.
- [11] Hu S, Xiong Y Z, Zhang B, et al. A SiGe BiCMOS transmitter/receiver chipset with on-chip SIW antennas for terahertz applications [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, **47**(11): 2654-2664.
- [12] Afsar M N, Button K J. Precise millimeter-wave measurements of complex refractive index, complex dielectric permittivity and loss tangent of GaAs, Si, SiO₂, Al₂O₃, BeO, macor, and glass [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1983, **31**(2): 217-223.