

文章编号: 1672-8785(2020)11-0017-05

铋化铟晶片的电学均匀性研究

董 涛 赵 超 柏 伟 申 晨 吴 卿

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 铋化铟焦平面探测器是红外成像系统的重要组成部分, 对红外成像的成本和性能都有重要影响。铋化铟晶片的质量及均匀性决定了探测器的性能。通过霍尔效应测试、低温探针法以及微波光电导衰退法研究了铋化铟晶片的电学性能均匀性。结果表明, 所制备的铋化铟晶片的载流子浓度和电子迁移率的面分布较均匀, 但低温电阻率以及少数寿命的分布呈现较小的非均匀性变化, 这主要与铋化铟生长过程中的杂质分凝有关。

关键词: 铋化铟; 电学性能; 均匀性

中图分类号: TN304.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.11.003

Study on Electrical Uniformity of InSb Wafer

DONG Tao, ZHAO Chao, BAI Wei, SHEN Chen, WU QING

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: InSb focal plane detector is an important part of infrared imaging system, which has a significant impact on the cost and performance of infrared imaging. The quality and uniformity of InSb wafer determine the performance of the detector. Hall effect test, low temperature probe method and microwave photoconductivity method are used to study the electrical uniformity of InSb wafer. The results show that the surface distribution of carrier concentration and electron mobility is uniform, but the low temperature resistivity and minority carrier lifetime distribution show a small non-uniformity change, which is mainly related to impurity segregation during the growth of InSb.

Key words: InSb; electrical property; uniformity

0 引言

铋化铟是一种Ⅲ-Ⅳ族化合物半导体材料。由于具有极高的电子迁移率、较小的禁带宽度、极小的有效电子质量以及较稳定的物理化学性质等优异特点, 它在红外探测器和霍尔器

件等领域受到了广泛关注^[1-2]。随着铋化铟焦平面阵列器件的规格向大规模方向发展, 像元数逐渐增多。采用大尺寸铋化铟晶片材料将能极大地提高芯片制备效率, 降低探测器的生产成本; 然而另一方面, 对铋化铟单晶体的质

收稿日期: 2020-08-18

作者简介: 董涛(1992-), 男, 河北唐山人, 助理工程师, 硕士, 主要从事红外探测器材料研究。

E-mail: 675489691@qq.com

量、电学特性等也提出了更严格的要求，特别是微区的电学特性及其均匀性将极大影响后续制备器件性能的优劣^[3]。

本文基于霍尔效应测量系统，采用低温探针法分析铋化钢晶片在实际工作温度下的载流子浓度、电子迁移率和电阻率分布，并用微波光电导衰退法 (Microwave Photo Conductivity Decay, μ -PCD) 测量晶片少子寿命的面分布情况。

1 实验

实验所用晶片按照图 1 所示流程制备。采用切克劳斯基法生长了特定晶向的铋化钢单晶。晶体中掺入碲元素进行掺杂，其目标是使晶体导电类型为 N 型。通过对晶体进行切割、倒角、研磨及机械化学抛光，将其加工成厚度为 500~550 μm 的铋化钢晶片，以进行晶片霍尔测试、低温探针测试以及低温少子寿命测试。

1.1 霍尔测量

将抛光后的铋化钢晶片按图 2 虚线所示切割成小方块 (尺寸为 1 cm \times 1 cm)。在 77 K 温度下进行霍尔测试，磁场强度为 1000 Gs，测试电流为 1 mA。分别将各小方块焊接测试电极，然后通过导线与测试板相连。焊接电极为钢。通过电极测试保证焊接为欧姆接触，并利用霍尔效应测试系统测量每个小方块的载流子浓度和载流子迁移率。

1.2 低温探针测试及设计

如图 3 所示，铋化钢晶片上设计了不同方块大小和间距的线性阵列。采用标准的光刻和热蒸发工艺，分别沉积了一薄层钢和一层金。其中每个触点均可独立进行测试。实验在低温

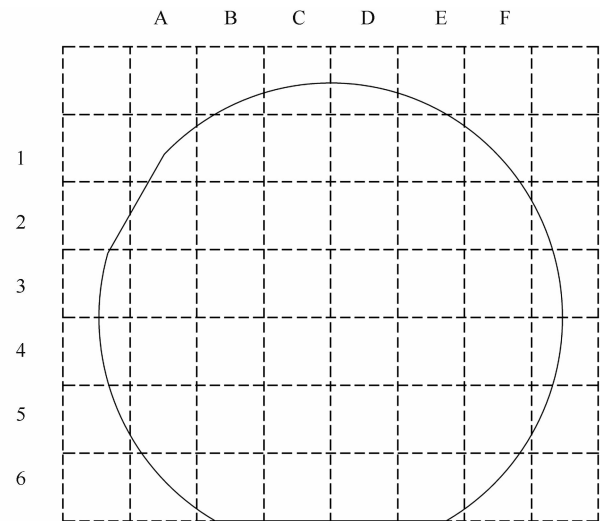


图 2 晶片划切示意图

探针平台上进行，测试温度为 77 K。测试过程中，将两探针置于两侧较大的触点上，作为电流的输入端和输出端。通过移动另两个探针测定不同间距间的电压差，以测定电阻率的变化。电流-电压测量方式是在相邻的触点之间从一侧到另一侧电极扫描 (扫描电流为 -100~100 mA)。

1.3 少子寿命测量

半导体中的非平衡少数载流子寿命与晶体的完整性息息相关。 μ -PCD 法是一种基于瞬态法的少子寿命测量方法，即利用脉冲电或闪光在半导体中激发出非平衡载流子，改变半导体的体电阻；通过测量体电阻或两端电压的变化规律，直接获得半导体材料的寿命。本文采用低温少子寿命测试仪 (德国 Freiberg Instruments 公司) 对抛光后的铋化钢晶片进行面扫描测试。脉冲激发光的波长为 980 nm，功率为 500 mW，光束直径为 0.17 mm，扫描步长为 0.2 mm，测试温度为 77 K。

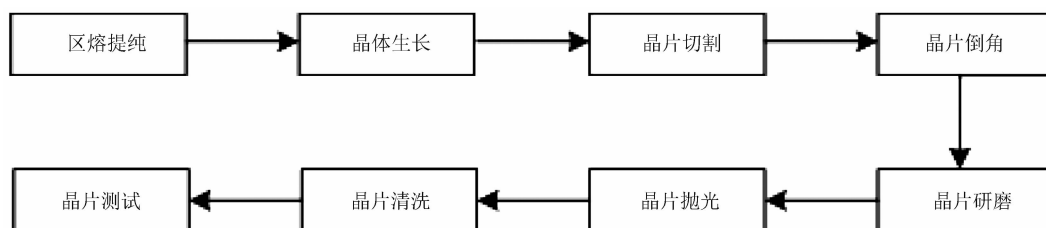


图 1 铋化钢晶片的制备流程图

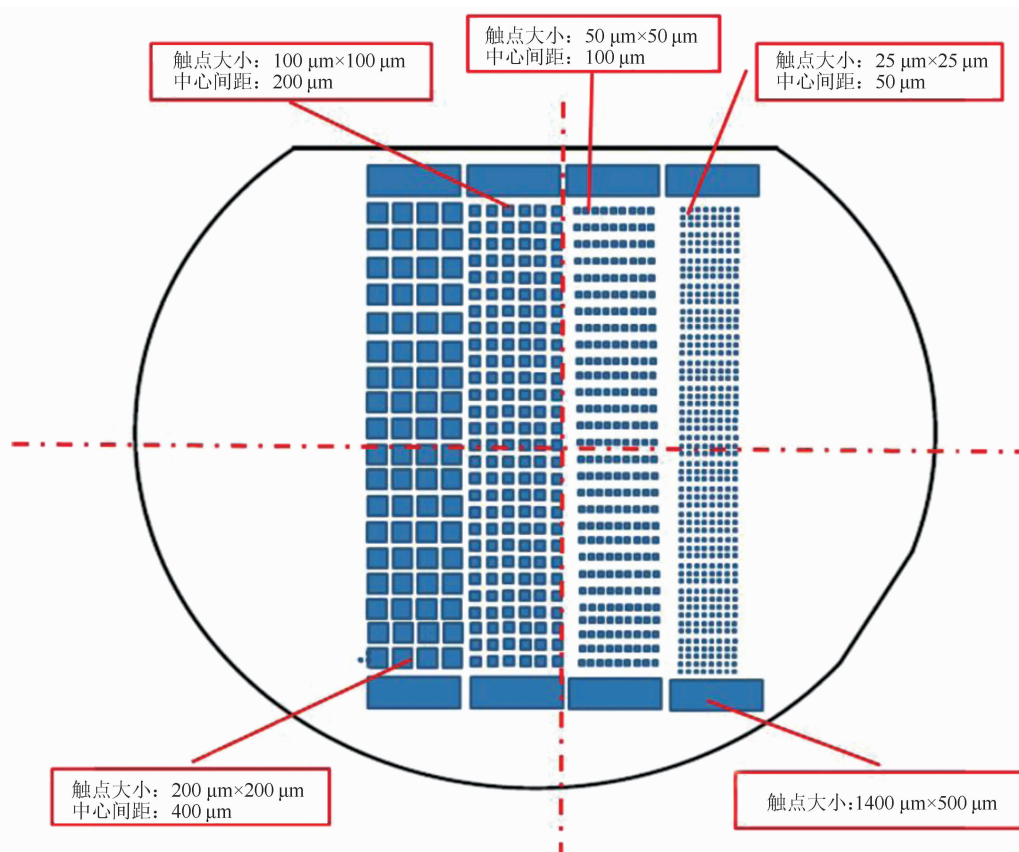


图 3 不同间距电阻率结构的测试示意图

2 结果与讨论

2.1 霍尔测试结果

表 1 和表 2 分别列出了 InSb 晶片载流子浓度和电子迁移率的分布值。可以看出, 载流子浓度为 $3.83 \times 10^{14} \sim 4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 电子迁移率为 $3.77 \times 10^5 \sim 4.03 \times 10^5 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$ 。从总体分布来看, 晶片大部分分割区域内的变化差别不大, 说明在该测量尺度范围内, 晶片的电学性能较均匀, 未表现出由掺杂剂分布不均造成的晶片电学性能的极大变化。

2.2 低温探针测试结果

通过每两个触点间的 I-V 曲线, 测定了 InSb 晶片一定距离范围内的电阻率变化。I-V 曲线非常线性, R^2 值均高于 0.99, 验证了触点是欧姆接触的结果。如图 4 所示, 在该测量尺度范围内, 电阻率存在波动变化。其中某些区域甚至趋近于周期性变化, 如图 4 中的虚线框所示。这种电阻率的变化可能是由杂质分布

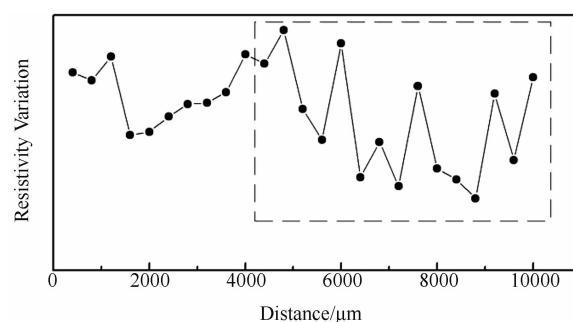


图 4 用低温探针法测量的电阻率变化

不均匀造成的。

对于固相-液相界面来说, 由于杂质在不同相中的溶解度不同, 所以杂质在界面两边材料中的浓度分布不一样。这就是所谓的杂质分凝现象^[4]。晶体生长过程往往不是一个平衡状态。根据 Berton J A 等人提出的 BPS 理论^[5], 使用一个有效分凝系数来表示动态过程中的分凝系数:

$$K_{eff} = K_0 / [K_0 + (1 - K_0) \exp(-\delta V / D)] \quad (1)$$

表 1 InSb 晶片载流子浓度的分布值

	载流子浓度/ 10^{14} cm^{-3}					
	A	B	C	D	E	F
1	/	3.98	3.92	3.96	3.98	/
2	/	3.94	3.95	3.98	3.91	3.94
3	3.85	3.87	3.84	3.91	3.93	4.00
4	3.92	3.88	3.85	3.98	3.88	3.87
5	3.93	3.94	3.91	3.89	3.83	3.85
6	/	3.97	3.93	3.85	3.81	/

表 2 InSb 晶片电子迁移率的分布值

	电子迁移率/ $10^5 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$					
	A	B	C	D	E	F
1	/	3.88	3.94	3.90	3.77	/
2	/	3.92	3.91	3.88	3.95	3.92
3	4.01	3.99	4.02	3.95	3.93	3.85
4	3.94	3.98	4.01	3.88	3.98	3.99
5	3.93	3.92	3.95	3.97	4.03	4.01
6	/	3.89	3.93	4.01	4.05	/

式中, K_0 为平衡分凝系数, δ 为边界层的厚度, V 为微观生长速率, D 为杂质在熔体中的扩散系数。根据 BPS 理论, 如果边界层厚度和微观生长速率发生变化, 那么有效分凝系数也会改变, 导致晶体杂质浓度变化, 从而引起电学均匀性变化。

另外, 晶体在生长过程中存在一定的过冷效应^[6]。当界面温度为 $T_m - \Delta T$ 时, 晶体开始生长。其中 ΔT 是过冷所需的温差。然而当生长开始后, 晶体从熔体中凝固时会释放出潜热, 使局部温度增加 ΔT_1 ($\Delta T_1 \leq \Delta T$)。这个过程会减慢或者使形核和生长停止, 直到局部温度再次接近 $T_m - \Delta T$ 。这种反复的周期性过冷条件变化导致周期性的杂质浓度分布不均, 从而表现出电阻率的波动变化。

但是本次测量中这种变化周期的量化是复杂的。因为设计的阵列方向与实际的电阻率变化方向并不一致, 所以无法利用该数据推断确切变化的间距、形状及一致性。

2.3 少子寿命测试结果

图 5 和图 6 分别为 InSb 晶片少子寿命的

面分布图和数值分布图。从图中可以看出, 少子寿命在 $0.32 \sim 0.42 \mu\text{s}$ 之间, 中位值在 $0.38 \mu\text{s}$ 左右。总体来看, 寿命分布较均匀。但晶片中心部分与边缘部分相比, 存在零星分布的低寿命区域。这可能与杂质部分分布不均有关。因为半导体中的杂质会成为复合中心, 影响 N 型半导体的空穴生存时间, 所以在杂质积聚的地方, 少子寿命越低^[7]。在铋化铟晶体的生长过程中, 当生长固液界面呈现非平整液面(即凸液面或凹液面)时, 由于杂质的平衡分凝系数不同, 先凝固部分与后凝固部分区域的杂质浓度存在差异, 导致少子寿命的差异。另外, 位错缺陷也是导致少子寿命降低的重要因素^[8]。但是图 6 中少子寿命的不均匀性并未呈现周期性或规律性的连续变化, 与 2.2 节中电阻率的变化并不对应, 说明少子寿命的非均匀变化受多种因素的共同作用。

3 结束语

通过霍尔测试、低温探针测试、少子寿命测试等多种手段研究了铋化铟晶片的电学均匀性。晶片在百微米尺度范围内表现出一定的电

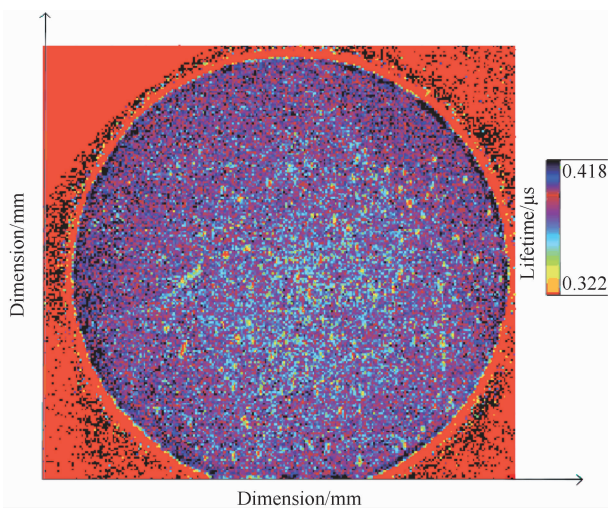


图 5 InSb 晶片少子寿命的面分布图

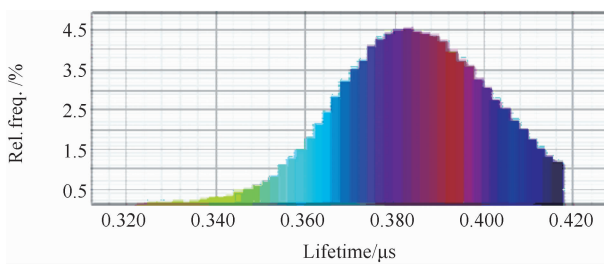


图 6 InSb 晶片少子寿命的测量值分布直方图

学非均匀性变化, 而杂质的均匀分布是影响晶片微区电学均匀性的关键因素。这为后续开展 InSb 器件非均匀性研究以及改善材料均匀性提供了有效的研究手段及方向。另外, 铋化钢材料的不均匀性如何导致器件性能的变化及其机理研究将是我们要关注的另一个重点。

参考文献

- [1] 赵超, 赵秀峰, 柏伟. InSb 衬底表面的氧化层研究 [J]. *红外*, 2017, **38**(1): 12-17.
- [2] 柏伟, 赵超, 龚志红. InSb 晶片的机械加工损伤层研究 [J]. *红外*, 2017, **38**(1): 6-11.
- [3] 张艳辉. 图像识别在微区四探针测试技术中的应用 [D]. 天津: 河北工业大学, 2004.
- [4] 俞振中, 金刚, 陈新强, 等. 铋化钢单晶的小平面生长及孪晶 [J]. *物理学报*, 1980, **29**(1): 11-18.
- [5] Burton J A, Prim R C, Slichter W P. The Distribution of Solute in Crystals Grown from the Melt. Part I. Theoretical [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1953, **21**(11): 1987-1991.
- [6] Levan P D, Sood A K, Wijewarnasuriya P, et al. Interface and Facet Control during Czochralski Growth of (111) InSb Crystals for Cost Reduction and Yield Improvement of IR Focal Plane Array Substrates [C]. *SPIE*, 2014, **9220**: 922003.
- [7] Wu X L, Zhang K F, Huang Y M, et al. Recombination Lifetime Characterization and Mapping of p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Mesa Structure Using the Microwave Photoconductivity Decay (μ -PCD) Technique [C]. *SPIE*, 2008, **6221**: 62211C.
- [8] 于丽君, 段晋胜. 多晶硅片少子寿命的影响因素研究与分析 [J]. *电子工业专用设备*, 2012, **20**(6): 26-30.