

文章编号: 1672-8785(2022)12-0026-04

## 钝化膜应力对锑化铟器件性能的影响

米南阳 宁 提 李忠贺 崔建维

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 随着 InSb 红外探测器关键尺寸的不断缩小, 钝化膜应力的对器件  $I-V$  性能的影响越发明显。为了降低探测器芯片的应力, 研究了一种由  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  组成的复合钝化膜体系。通过改变气体的射频时间, 在 InSb 晶片上淀积厚度分别为 300 nm、500 nm、700 nm 和 900 nm 的钝化膜, 测量并计算了不同厚度钝化膜的应力。当厚度为 700 nm 时, 钝化膜的应力最小值为  $-1.78 \text{ MPa}$ 。研究了具有不同应力钝化膜的器件的  $I-V$  特性, 发现厚度为 700 nm 时 InSb 芯片具有更加优异的  $I-V$  特性。通过调整复合钝化膜的厚度, 降低了钝化膜的应力, 有效地提升了 InSb 探测器的性能。

**关键词:** 复合钝化膜; 应力; InSb 红外探测器; 伏安特性

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.12.005

## Effect of Passivation Film Stress on the Performance of InSb Devices

MI Nan-yang, NING Ti, LI Zhong-he, CUI Jian-wei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** With the decreasing of the key size of InSb infrared detector, the influence of the passivation film stress on the  $I-V$  performance of the device becomes more and more obvious. In order to reduce the stress of the detector chip, a composite passivation film system consisting of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{SiON}$  was studied. Passivation films with thicknesses of 300 nm, 500 nm, 700 nm and 900 nm were deposited on InSb wafers by varying the radio frequency (RF) time of the gas. The stresses of passivation films with different thicknesses were measured and calculated. When the thickness is 700 nm, the minimum stress of the passivation film is  $-1.78 \text{ MPa}$ . The  $I-V$  characteristics of devices with different stress passivation films are investigated. It is found that the InSb chip has better  $I-V$  characteristics when the thickness is 700 nm. By adjusting the thickness of composite passivation film, the stress of passivation film is reduced, and the performance of InSb detector is effectively improved.

**Key words:** composite passivation film; stress; InSb infrared detector; voltage-current characteristic

收稿日期: 2022-05-25

作者简介: 米南阳(1996-), 男, 河南安阳人, 助理工程师, 主要研究方向为红外探测器技术。

E-mail: nanyangmi@163.com

## 0 引言

InSb 红外探测器在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波长范围内具有较高的灵敏度和优异的可靠性, 因而被广泛地应用于军事领域<sup>[1]</sup>。随着焦平面阵列的集成度越来越高, 芯片关键尺寸减小, InSb 材料的表面状态成为影响红外探测器器件性能的关键因素。其中, 钝化膜直接与芯片表面接触, 因此钝化膜的质量直接决定了 InSb 红外器件的性能。钝化膜淀积在材料表面时会有应力作用于 InSb 的光敏元上, 导致 P-N 结的空间电荷区发生弯曲。如图 1 中曲线 B 所示, 在像元上施加反向偏置电压时, 由于 P-N 结性能的劣化, 在 P-N 结周围更容易产生漏电流, 并且随着偏置电压的提高, 漏电流逐渐增大, 像元的电学性能变差。由于应力造成  $I-V$  曲线的劣化, InSb 探测器器件中会出现输出噪声增大的现象。此外, 较大的应力还会影响器件的长期可靠性<sup>[2,3]</sup>。因此, 研究钝化膜的应力对于提升 InSb 红外器件的性能具有重要的意义。

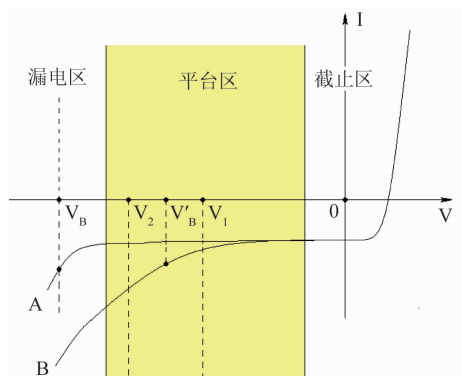


图 1 光电二极管的特征  $I-V$  曲线

从应力的产生原理上分析, 应力包括本征应力和热应力。其中, 本征应力来自于薄膜淀积过程中的内部缺陷; 热应力产生于薄膜和衬底热膨胀系数的差异。从应力的作用方向划分, 应力分为张应力和压应力, 分别代表了应力作用的不同方向。有学者早前就注意到膜层应力对器件性能的影响。InSb 红外探测器常见的钝化膜介质为  $\text{SiO}_2$ , 其应力大小为  $10^7\sim 10^8\ \text{Pa}$ 。该应力较大, 不利于探测器芯片的光电性能和组件的长期可靠性。通过研究淀积膜

层时的参数(如气体流量、淀积温度、单层膜的厚度以及反应的压力等), 可以获得更小的单层膜应力<sup>[4-5]</sup>。另一种有效降低  $\text{SiO}_2$  膜层应力的方法是, 使用一种具有相反应力方向的膜层抵消  $\text{SiO}_2$  的应力。对于  $\text{SiO}_2/\text{SiON}$  复合钝化体系而言, SiON 与  $\text{SiO}_2$  具有相反的应力方向, 因此 SiON 膜可以用来平衡  $\text{SiO}_2$  的应力, 从而获得应力更小的膜层体系<sup>[6]</sup>。

本文主要针对  $\text{SiO}_2$  和 SiON 复合钝化体系, 研究钝化膜的应力对 InSb 红外器件光电性能的影响。通过改变 SiON 的淀积时间, 获得具有不同厚度的钝化膜。通过测量 InSb 材料表面在淀积钝化膜前后曲率半径的变化, 计算不同厚度钝化膜的应力, 并且研究应力大小对红外器件光电性能的影响。

## 1 试验

将 2 in 无图形 InSb 晶片作为衬底淀积  $\text{SiO}_2/\text{SiON}$  钝化膜, 使用台阶仪测量晶片在淀积钝化膜前后曲率半径的变化, 并计算钝化膜的应力。采用等离子化学气相沉积 (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 方法淀积  $\text{SiO}_2$  和 SiON 钝化膜, 钝化温度在  $160\sim 200^\circ\text{C}$  之间。在保持射频功率、气体流量等参数不变的情况下, 通过改变  $\text{SiO}_2$  和 SiON 钝化膜生长时间控制钝化膜的生长厚度, 最终获得钝化膜厚度分别为 300 nm、500 nm、700 nm 和 900 nm 的 4 个样品。当薄膜淀积在晶片表面上时, 衬底会在应力的作用下发生弯曲。分别测试 4 个样品淀积钝化膜前和淀积后 InSb 晶片的曲率半径, 并通过式(1)计算钝化膜的应力:

$$S = \frac{E_s t_s^2}{6(1-\gamma)t_f} \left( \frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (1)$$

式中,  $E_s$  为 InSb 的杨氏模量;  $\gamma$  为 InSb 的泊松比;  $t_s$  为 InSb 的厚度;  $t_f$  为淀积在 InSb 晶片上钝化层的厚度;  $R_0$  为淀积钝化膜前 InSb 晶片的曲率半径;  $R_f$  为淀积钝化膜后 InSb 晶片的曲率半径。曲率半径  $R_0$ 、InSb 的厚度  $t_s$  和钝化膜的厚度  $t_f$  分别由台阶仪、数字测厚仪和椭偏仪测得。

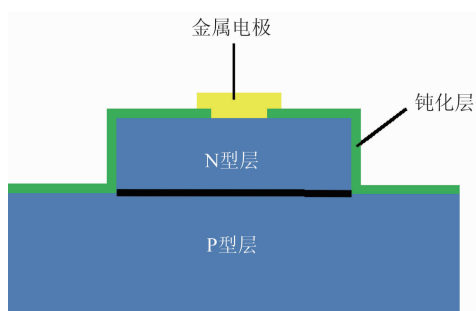


图 2 台面二极管结构的示意图

为了研究不同应力的钝化膜对 InSb 红外探测器性能的影响，制备具有不同钝化膜厚度的台面二极管结构。具体工艺如下：以 2 in N 型 InSb 为衬底，通过热扩散法在晶片表面掺杂 Cr，形成具有一定浓度的 P 型层，获得 P-N 结；随后通过湿法刻蚀方法得到台面结构；使用 PECVD 设备在台面上生长  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  钝化膜，并且通过改变  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  钝化膜的射频时间，获得钝化膜总厚度分别为 300 nm、500 nm、700 nm 和 900 nm 的四个样品；然后通过湿法刻蚀方法分别在 P 型区和 N 型区腐蚀出生长金属电极的窗口；使用离子束沉积方法在 InSb 晶片表面上生长相同厚度的金属电极，用于 P 型区和 N 型区的信号引出。图 2 为台面二极管结构的示意图。通过以上工艺制造出探测器芯片后，使用 Agilent Technologies B1500A 设备测试其电学性能。所有测试均在液氮(77 K)环境下进行。

## 2 结果与分析

随着红外探测器芯片集成化的提高，探测器结构的尺寸不断缩小，淀积在芯片上的薄膜的应力对芯片性能的影响越来越关键。因此计算探测器芯片上的钝化膜应力，通过改变 PECVD 的射频时间来调整复合钝化膜中各组分的厚度，以获得整体应力更小的钝化体系。这对于优化红外探测器的器件性能具有重要的指导意义。

表 1 不同厚度钝化膜淀积在 InSb 晶片上的应力

| 钝化膜厚度/nm | 300    | 500    | 700   | 900    |
|----------|--------|--------|-------|--------|
| 应力/MPa   | -16.92 | -10.94 | -1.78 | -20.19 |

改变 PECVD 的射频时间，在 4 个无图形的 InSb 晶片上分别获得具有不同钝化膜厚度的样品。使用椭偏仪测量出钝化膜的总厚度  $t_f$ ，并且使用台阶仪分别测量出钝化前后 InSb 衬底的曲率半径  $R_0$  和  $R_f$ 。通过式(1)计算出 4 个无图形 InSb 样品上钝化膜的应力。如表 1 所示，当厚度为 300 nm、500 nm、700 nm 和 900 nm 时，钝化膜的应力分别为 -16.92 MPa、-10.94 MPa、-1.78 MPa 和 -20.19 MPa。其中，数值的正负代表了应力的方向，绝对值代表了应力的方向，绝对值代表了应力的方向，绝对值代表了应力的方向。

图 3 所示为复合钝化膜的应力随厚度的变化曲线。可以看出，随着厚度的增加，复合钝化膜的应力绝对值先减小再增大。特别地，钝化层厚度在 700 nm 时， $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  构成的复合钝化体系具有最小的应力(-1.78 MPa)。

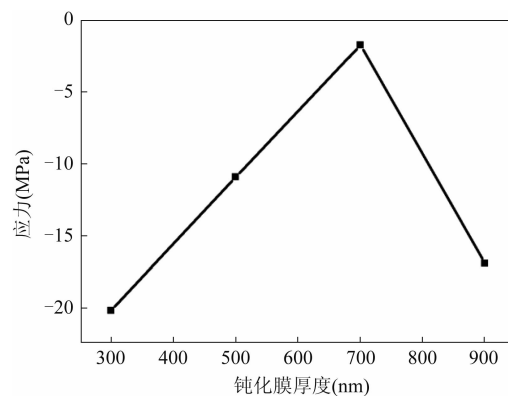


图 3 不同厚度钝化膜淀积在 InSb 晶片上的应力

为了进一步研究钝化膜的应力大小对 InSb 红外探测器光电性能的影响，利用湿法刻蚀技术在 InSb 晶片上制造了台面结构 P-N 结，同样地改变 PECVD 的射频时间，在台面上淀积  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  复合钝化膜。在液氮温度下，对 4 个具有台面二极管结构的探测器芯片进行光电性能测试，测试电压的范围是 200 mV ~ -1 V。I-V 测试结果如图 3 所示。从中可以看出，钝化膜厚度为 700 nm 时，样品的 I-V 曲线在电压变化至 -1 V 时仍保持良好的反向平坦区。I-V 曲线说明在测试电压范围内，该样品的钝化层未出现漏电现象。对于钝化膜厚度分别为 300 nm、500 nm 和 900 nm 的样品，

随着测试电压的减小,  $I$ - $V$  曲线均出现了不同程度的劣化。其中, 当电压变化至  $-500$  mV 时, 钝化膜厚度为  $900$  nm 的样品的  $I$ - $V$  曲线首先出现劣化现象。随后, 钝化膜厚度为  $300$  nm 和  $500$  nm 的样品的  $I$ - $V$  曲线分别在电压为  $-600$  mV 和  $-800$  mV 时出现劣化问题。特别地, 当反向偏置电压为  $-1$  V 时, 钝化膜厚度为  $900$  nm 的样品的  $I$ - $V$  曲线劣化程度最大。钝化膜厚度为  $700$  nm 时, 样品钝化膜的应力最小, 芯片的反向击穿电压最高, 并且漏电流小。随着钝化膜应力的增大,  $I$ - $V$  曲线的反向击穿电压减小, 并且漏电流增大。以上结果说明, 钝化膜的应力大小显著地影响了 InSb 芯片的  $I$ - $V$  特性。当钝化膜的应力最小时, InSb 探测器芯片具有最优异的光电性能。

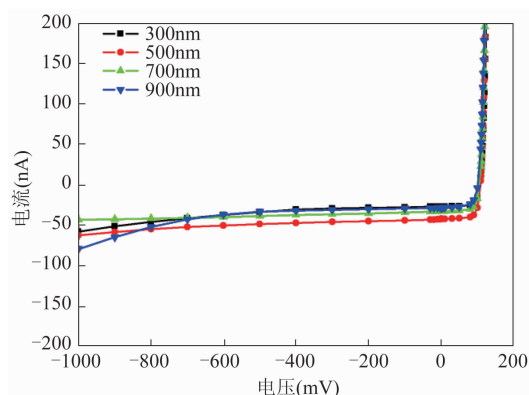


图 4 不同钝化膜厚度器件的  $I$ - $V$  测试结果

当  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  复合膜淀积在 InSb 晶片上时, 由于材料与衬底膨胀系数不同等原因, 钝化膜会在台面二极管的 P-N 结上产生应力, 使 P-N 结发生微小的形变。InSb 红外探测器芯片材料具有的特殊压阻效应使晶向上有微应力时, 其禁带宽度会发生变化。当外界施加反向偏置电压时, 会有一部分电流从 P-N 结变形的区域经过, 产生漏电流。而且随着应力的增加, P-N 结的弯曲程度变大。产生的漏电流随之增大, 导致探测器芯片的反向击穿电压减小,  $I$ - $V$  曲线明显劣化, 最终表现为器件的噪

声提高, 从而影响红外探测器的性能。

### 3 结束语

本文研究了钝化膜应力对 InSb 探测器光电性能的影响。在无图形的 InSb 晶片上淀积了厚度分别为  $300$  nm、 $500$  nm、 $700$  nm、 $900$  nm 的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiON}$  复合膜。通过测量晶片曲率半径的变化, 计算出不同厚度钝化膜的应力。制备了具有台面光电二极管结构的 InSb 探测器, 淀积了厚度分别为  $300$  nm、 $500$  nm、 $700$  nm 和  $900$  nm 的钝化膜, 测量并比较了 4 个样品的  $I$ - $V$  曲线。结果表明, 当改变复合钝化膜的厚度时, 钝化体系的总应力会发生变化。当钝化膜厚度为  $700$  nm 时, 应力的最小值为  $-1.78$  MPa。通过台面结构芯片的  $I$ - $V$  测试结果发现, 钝化膜的应力越小, 芯片的反向击穿电压越大, 说明探测器的光电二极管特性越优异。这一结果对于优化器件工艺中不同膜层的淀积参数具有指导意义。此外, 钝化膜应力的对探测器长期储存可靠性的影响还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 牟宏山. InSb 红外焦平面探测器现状与进展 [J]. 激光与红外, 2016, 46(4): 394-399.
- [2] 曹亮, 邝永变, 刘炜. 金电极薄膜微应力对 InSb 芯片性能的影响研究 [J]. 红外, 2016, 37(10): 7-9.
- [3] 龚晓霞, 肖婷婷, 杨瑞宇, 等. 不同钝化膜对 InSb 光伏探测器性能影响研究 [J]. 红外技术, 2020, 42(10): 953-957.
- [4] 孙俊峰, 石霞. PECVD  $\text{SiO}_2$  薄膜内应力研究 [J]. 半导体技术, 2008, 36(5): 397-400.
- [5] Kinoshita K. Recent Developments in the Study of Mechanical Properties of Thin Films [J]. Thin Solid Films, 1972, 12(1): 12-17.
- [6] 杨银堂. 半导体器件材料应力性质的研究 [J]. 微电子技术, 2000, 29(1): 37-43.