

## 微波退火和快速热退火下钛调制镍与锗锡反应

刘伟 平云霞 杨俊 薛忠营 魏星 武爱民 俞文杰 张波

## Reaction of titanium-modulated nickel with germanium-tin under microwave and rapid thermal annealing

Liu Wei Ping Yun-Xia Yang Jun Xue Zhong-Ying Wei Xing Wu Ai-Min Yu Wen-Jie Zhang Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 116801 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202118

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202118>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### n型GaN过渡族难熔金属欧姆电极对比

Comparative study of n-GaN transition group refractory metal Ohmic electrode

物理学报. 2019, 68(20): 206101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190717>

#### 后退火处理对锡氧化物表面等离子共振特性的影响

Effect of annealing treatment on characteristics of surface plasmon resonance for indium tin oxide

物理学报. 2018, 67(17): 177802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180435>

#### 热退火处理对AuGeNi/n-AlGaInP欧姆接触性能的影响

Study on the effect of thermal annealing process on ohmic contact performance of AuGeNi/n-AlGaInP

物理学报. 2020, 69(4): 048103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191720>

#### 单靶溅射制备铜锌锡硫薄膜及原位退火研究

Fabrication of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films by sputtering quaternary compound target and the research of in-situ annealing

物理学报. 2017, 66(22): 226801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.226801>

#### 倒置四结(IMM4J)太阳能电池中InGaAs(1.0 eV)和InGaAs(0.7 eV)子电池高能电子辐照退火效应

Thermal annealing effects of InGaAs (1.0 eV) and InGaAs (0.7 eV) sub-cells of inverted metamorphic four junction (IMM4J) solar cells under 1 MeV electron irradiation

物理学报. 2020, 69(22): 228802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200557>

#### Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As/GaAs(001)薄膜退火过程的热力学分析

Thermodynamic analysis of Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As/GaAs (001) in annealing process

物理学报. 2018, 67(8): 080503 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172718>

## 微波退火和快速热退火下钛调制镍与锗锡反应\*

刘伟<sup>1)2)</sup> 平云霞<sup>1)†</sup> 杨俊<sup>1)2)</sup> 薛忠营<sup>2)</sup> 魏星<sup>2)</sup>  
武爱民<sup>2)</sup> 俞文杰<sup>2)</sup> 张波<sup>2)‡</sup>

1) (上海工程技术大学数理与统计学院, 上海 201620)

2) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2020年12月14日收到; 2021年1月7日收到修改稿)

本文研究了1 nm 钛作为插入层的条件下, 镍与锗锡合金在不同退火温度下的固相反应, 比较了微波退火和快速热退火对镍锗锡化物形成的影响. 研究表明: 在微波退火 300 °C、快速热退火 350 °C 条件下, 可以形成连续平整的镍锗锡薄膜. 通过进一步分析镍锗锡薄膜的元素分布, 发现1 nm 钛插入层发生“层转移”现象, 钛在镍与锗锡合金反应后分布在样品的表面, 由“插入层”变为“盖帽层”; 而锡元素因受到金属钛的调制作用, 主要分布在镍锗锡薄膜/锗锡衬底的界面.

**关键词:** 微波退火, 快速热退火, 锗锡合金, 钛插入层

**PACS:** 68.60.Dv, 68.35.Ct, 68.55.J-, 68.37.-d

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202118

## 1 引言

随着超大规模集成电路集成度的快速增加, 晶体管的单元尺寸需要不断的缩小. 当达到纳米节点以下, 短沟道效应<sup>[1]</sup>、隧穿效应<sup>[2]</sup>和亚阈值漏电<sup>[3]</sup>等因素影响了晶体管的性能. 目前硅材料逐渐达到了其理论上的物理极限, 需要新的半导体材料才能实现晶体管尺寸的进一步缩小. 同为 IV 族元素的锗 (germanium, Ge) 和锡 (stannum, Sn) 等引起了人们的极大关注<sup>[4,5]</sup>. 研究人员发现锗锡 (germanium-tin alloy, GeSn) 合金比 Ge 具有更高的空穴迁移率<sup>[6,7]</sup>, 并对 GeSn 与镍 (nickel, Ni) 形成镍锗锡化物 (Ni stanogermanide, NiGeSn) 的过程、NiGeSn 的性质以及接触电阻等方面进行了研究. 如 Li 等<sup>[8]</sup>研究了 NiGeSn 的电学性质; Demeulemeester 等<sup>[9]</sup>研究了 Ni 和 GeSn 合金反应中的

Sn 原子扩散性质; Nishimura 等<sup>[10]</sup>研究了三种不同组分 Sn 的 GeSn 合金和 Ni 反应后的 NiGeSn 薄膜性质; Liu 等<sup>[11]</sup>研究了 Sn 含量为 5.3% 的 GeSn 和 Ni 反应的特性; Wan 等<sup>[12]</sup>研究了 Pt 插入层对生成 NiGeSn 薄膜质量的影响; Khiangte 等<sup>[13]</sup>研究了 Ge/Si(001) 衬底上通过分子束外延生长 GeSn 的应变弛豫程度的控制机制等. 随着研究的深入, 人们发现随着 Sn 含量的增加, 很难生成较平整的 NiGeSn 薄膜<sup>[14]</sup>, 但 Sn 含量的增加可使 GeSn 从间接带隙变成直接带隙<sup>[15,16]</sup>, 这在光学器件方面可进一步提高 GeSn 的光学性能<sup>[17]</sup>, 因此对高 Sn 含量的 GeSn 的研究变得非常有意义.

此外, 由于微波退火 (microwave annealing, MWA) 与快速热退火 (rapid thermal annealing, RTA) 相比可以降低热预算, 研究人员对微波退火的工艺进行了深入研究. Yi 等<sup>[18]</sup>研究发现由于微波退火有较少的热预算, 用微波退火的方式可以抑

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61604094) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xyping@sues.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: bozhang@mail.sim.ac.cn

制 Ge 扩散或 GeO 解析. Liu 等<sup>[19]</sup> 研究发现用微波退火的方式可有效抑制双极性泄漏, 与快速热退火相比微波退火后器件的迁移率提高了 2 倍.

本文研究了在 1 nm Ti 作为插入层的条件下, 高 Sn(8%) 含量的 GeSn 与 Ni 的固相反应, 对比了微波退火和快速热退火条件下对生成 NiGeSn 薄膜的影响. 研究表明, 在微波退火 300 °C 和快速热退火 350 °C 条件下, 可以形成连续平整的 NiGeSn 薄膜, Ti 主要分布在样品的表面, Sn 主要分布在 NiGeSn/GeSn 的界面.

## 2 实验

实验采用 8 in (1 in=2.54 cm) 的 n 型 Si(100) 晶片作为衬底材料, 利用减压化学气相法沉积 10 nm 的 Ge 缓冲层, 随后生长 50 nm 的 Sn 含量为 8% 的 GeSn 层, 材料结构为 GeSn/Ge/Si. 将 GeSn/Ge/Si 样品通过去离子水和稀氢氟酸 (HF:H<sub>2</sub>O = 1:10) 清洗后, 用氮气枪将其吹干, 然后利用电子束蒸发依次在 GeSn/Ge/Si 衬底上生长 1 nm Ti, 10 nm Ni, 之后将其切成 2 cm × 2 cm 的小块若干, 将样品分别放进微波退火炉和快速热退火炉进行退火, 退火温度为 150, 200, 250, 300, 350 和 400 °C, 退火氛围为 N<sub>2</sub>, 退火时间为 60 s. 退火后, 用稀盐酸溶液 (HCl:H<sub>2</sub>O = 1:10) 刻蚀未反应的 Ni, 刻蚀时间为 60 s.

借助四探针方块电阻测试仪 (four-point probe, FPP)、原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM)、透射电子显微镜 (cross-section transmission electron microscopy, XTEM)、能量色散 X 射线光谱 (energy dispersive x-ray spectrometer, EDX) 等, 对不同温度条件下的样品进行了测试表征.

## 3 实验结果

### 3.1 方块电阻测试

微波退火与快速热退火条件下, 样品方块电阻值随退火温度的变化如图 1 所示. 在微波退火条件下, 当退火温度为 150—250 °C 时, 样品的方块电阻较小; 当退火温度到 300 °C 时, 样品的方块电阻出现了极小值; 当温度大于 300 °C 时, 由于退火温度的升高使镍锗锡化物的表面发生了部分团聚, 破

坏了镍锗锡化物薄膜的连续性 (见图 2), 因此使样品的方块电阻增加. 在快速热退火条件下, 当温度为 150—250 °C 时, Ni 与 GeSn 反应生成的镍锗锡化物是富镍相<sup>[20]</sup>, 因此方块电阻值较大; 当退火温度在 300—400 °C 时, 方块电阻变小, 生成了单镍相 NiGeSn, 与文献报道的 400 °C 退火得到低电阻率的 NiGeSn 结果一致<sup>[21]</sup>. 依据 Demeulemeester 等<sup>[9]</sup> 的研究结果, 对于退火温度为 350—400 °C 的样品, 富镍相已经完全转化为单镍相.

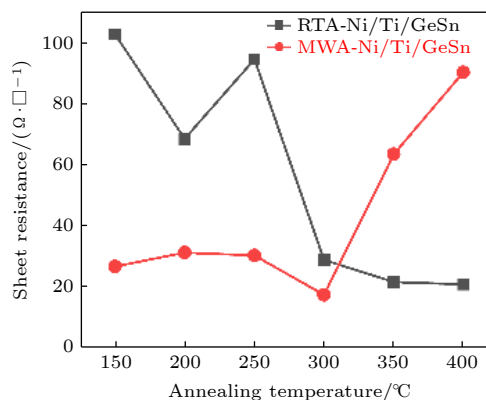


图 1 Ni/Ti/GeSn 的方块电阻随退火温度的变化

Fig. 1. Sheet resistance of Ni/Ti/GeSn samples annealed at various temperatures.

### 3.2 AFM 表征

为了研究样品退火后的表面形貌, 分别对微波退火和快速热退火后的样品进行了 AFM 测试, 测试结果如图 2 所示. 其中, 图 2(a)—(c) 分别是微波退火 150, 250 和 350 °C 样品的 AFM 测试图. 实验结果显示, 随着温度的升高, 表面粗糙度 (root mean square, RMS) 值在不断增加, 当退火温度为 350 °C 时, 样品表面有“岛状”结构形成, 发生了部分团聚, RMS 值为 3.18 nm. 图 2(d)—(f) 分别是快速热退火 150, 250 和 350 °C 样品的 AFM 测试图, 实验结果显示, 随着退火温度在升高, RMS 值有变大趋势. 在退火温度 350 °C 时, 样品表面平整, RMS 值仍然小于 1 nm.

### 3.3 TEM 和 EDX 表征

为了探究不同退火方式对镍锗锡化物的影响以及反应后样品元素的分布状况, 对微波退火 300 °C 和快速热退火 350 °C 条件下的样品进行了 XTEM, EDX 和 EDX 映射表征, 如图 3 所示. 图 3(a)—(c) 分别给出微波退火 300 °C 时样品的

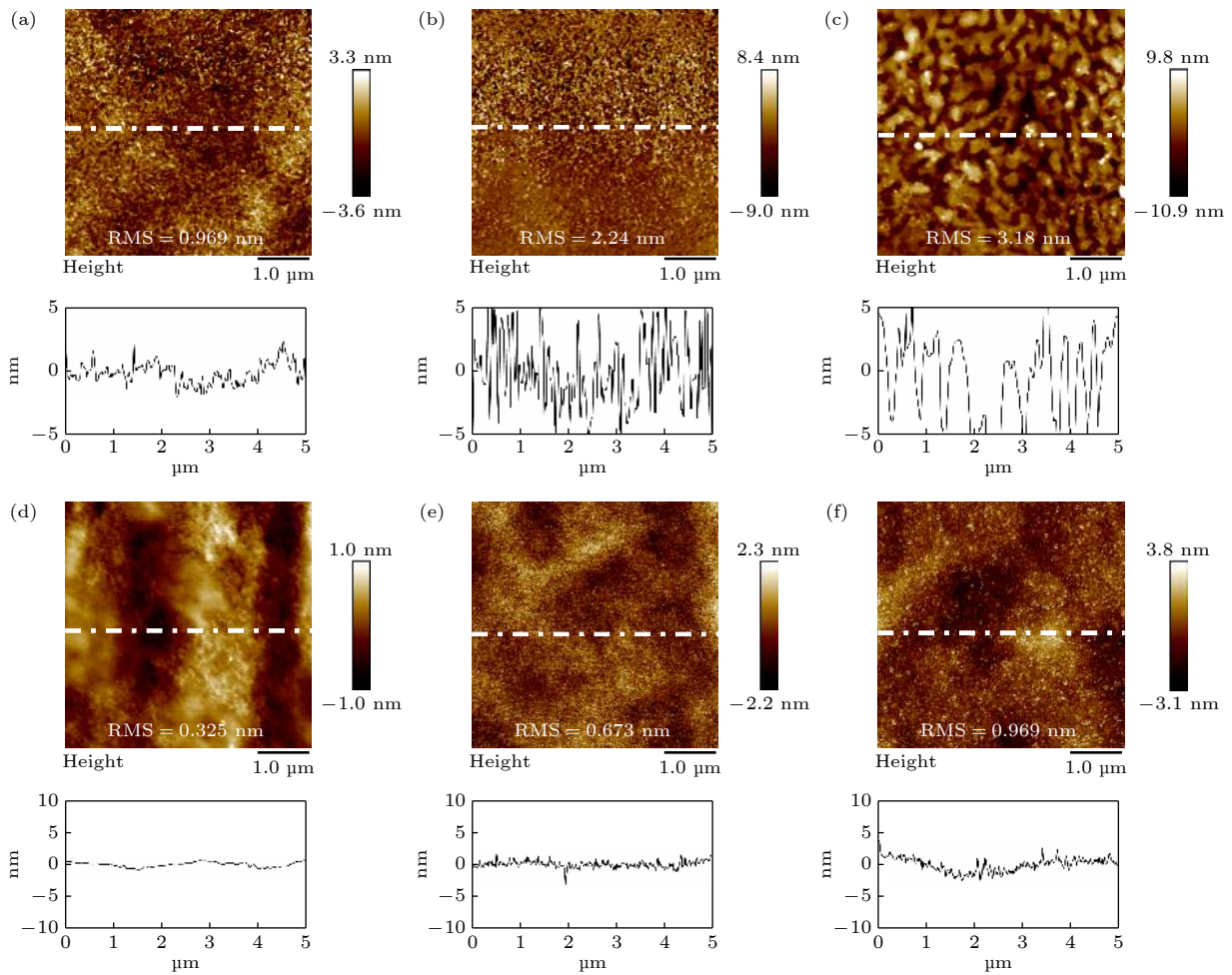


图 2 Ni/Ti/GeSn 样品不同退火方式、不同退火温度下的 AFM 测试图 (a)—(c) 微波退火 150, 250, 350 °C; (d)—(f) 快速热退火 150, 250, 350 °C

Fig. 2. AFM images of annealed Ni/Ti/GeSn samples: (a)–(c) MWA at 150, 250 and 350 °C; (d)–(f) RTA at 150, 250 and 350 °C.

XTEM, EDX 及 EDX 映射图, 从图 3(a) 可以看出, 在微波退火 300 °C 时生成了连续平整的 NiGeSn 薄膜, 且 NiGeSn/GeSn 的界面较平整. 从图 3(b) 和图 3(c) 可以看出, 在退火后 Ti 分布在样品的表面. 在退火开始时, Ni 原子通过 Ti 插入层与 GeSn 衬底进行反应, 随着反应的进行 Ni 原子不断的通过 Ti 插入层与 GeSn 衬底进行反应, 最终 Ti 分布在样品的表面, Sn 主要分布在 NiGeSn/GeSn 的界面. NiGeSn 薄膜中 Ni, Ge 和 Sn 原子百分比基本稳定, 其厚度约为 32 nm. 图 3(d)—(f) 分别是快速热退火 350 °C 时样品的 XTEM, EDX 以及 EDX 映射图, 从图 3(d) 可以看出, 在快速热退火 350 °C 条件下, 也可以得到连续平整的 NiGeSn 薄膜. 由图 3(e) 和图 3(f) 可知, 反应后 Ti 同样分布在样品的表面, Sn 也是主要分布在 NiGeSn/GeSn 的界面, NiGeSn 薄膜厚度约为 28 nm.

## 4 讨论

### 4.1 Ti 插入层的作用

在无 Ti 插入层的情况下, Ni 与 GeSn 衬底在 200 °C 退火时就开始发生固相反应生成镍锗锡化物; 在 400 °C 退火以上, NiGeSn 表面发生团聚效应, 导致 NiGeSn 薄膜的不连续 [12]. 根据 Quintero 等 [22] 的研究, 生成 NiGeSn 大致分为两个过程: 第一个过程是  $\text{Ni}_5(\text{GeSn})_3$  的解离, 即  $\text{Ni}_5(\text{GeSn})_3 \rightarrow 3\text{NiGeSn} + 2\text{Ni}$ ; 第二个过程是 Ni 与 GeSn 衬底的反应, 即  $2\text{Ni} + 2\text{GeSn} \rightarrow 2\text{NiGeSn}$ , 在生成 NiGeSn 的过程中 Sn/Ge 的比例基本是恒定的.

在有 Ti 插入层的情况下, 退火时 Ni 扩散通过 Ti 插入层与 GeSn 衬底发生反应. 首先, Ti 在整个反应过程中起到阻隔层的作用, 由于 Ti 的存在, 有效地降低了 Ni 与 GeSn 衬底的反应速率, 使

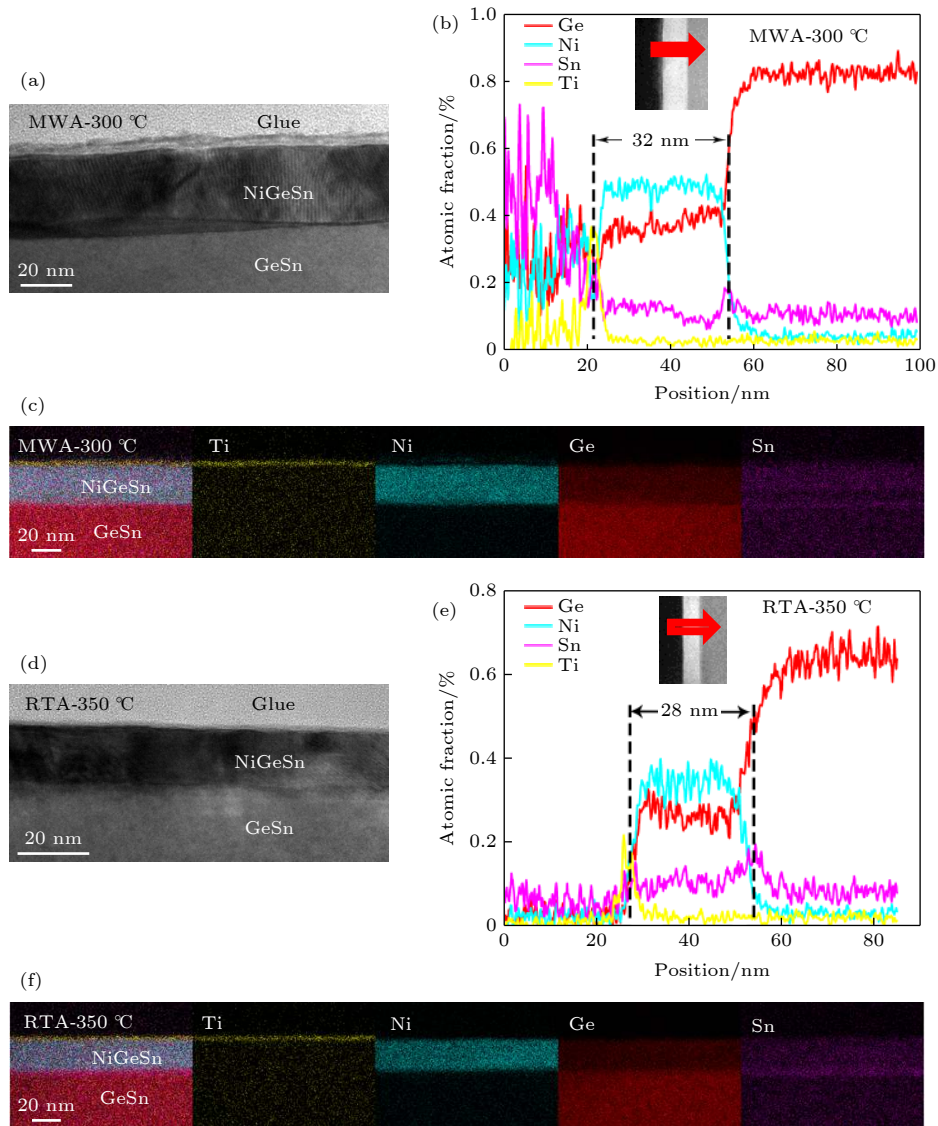


图 3 (a)—(c) 微波退火 300 °C 条件下的 XTEM 图、EDX 图和 EDX 映射图; (d)—(f) 快速退火 350 °C 条件下的 XTEM 图、EDX 图、EDX 映射图

Fig. 3. (a)–(c) XTEM, EDX, and EDX mapping images of MWA at 300 °C; (d)–(f) XTEM, EDX, and EDX mapping images of RTA at 350 °C.

得生成的 NiGeSn 薄膜界面较为平整. 其次, Ti 插入层也起到调制的作用, 随着反应的进行, Ni 不断向 GeSn 衬底扩散,  $Ni_5(GeSn)_3$  相逐渐转化为 NiGeSn 相, 直到全部 Ni 通过 Ti 插入层, 最终在 Ti 插入层的调制下生成了高取向的 NiGeSn. 此外, 因为 Ti 在低温下 (400 °C 以下) 本身不与 Ge 或 GeSn 衬底反应, 不能形成 TiGe 或 TiGeSn 化物, 所以 Ti 最终全部移到 NiGeSn 薄膜的表面, 形成 Ti“盖帽层”.

#### 4.2 Sn 元素的重新分布

Demeulemeester 等<sup>[9]</sup> 研究发现, 在 NiGeSn 的形成过程中, Sn 原子主要聚集在 NiGeSn/GeSn

的界面和 NiGeSn 的表面. Sn 的表面聚集会提高高温下 NiGeSn 的团聚, 进而影响薄膜的接触性能. 然而, 我们通过实验发现, 由于 Ti 插入层的存在, Sn 主要分布在 NiGeSn/GeSn 的界面, 表面附近 Sn 的含量相对较少, 如图 3(b) 和图 3(e) 所示. 我们推测, 可能由以下三个原因引起.

1) 据 Quintero<sup>[22]</sup> 报道, 在 Co 或 Pt 调制 Ni 和 GeSn 反应过程中, 容易生成  $CoSn_x$  或  $PtSn_x$  ( $NiSn_x$  不能生成), 影响 Sn 原子的扩散, 从而延缓了 Sn 原子到表面的聚集. 由于在本工作中存在着 Ti 插入层, 猜测反应的过程中在 NiGeSn/GeSn 的界面处生成了  $TiSn_x$  化合物, 起到了阻碍 Sn 扩散的作用, 使 Sn 较多的分布在 NiGeSn/GeSn 的界面处.

2) 对于 SiGe 衬底, 在 Ti 的调制作用下可形成高度取向的 NiTiSiGe 薄膜<sup>[23]</sup>. 因此, 对于 GeSn 衬底, 在 Ti 的调制作用下也形成了高度取向的 NiGeSn 薄膜, 与多晶薄膜相比它们具有更低的界面能, 因此对 Sn 的偏析产生了影响.

3) 据报道, Sn 的界面聚集可能也与界面处的应变有关<sup>[22,24]</sup>. 我们知道 Ni 和 Ti 的共价半径 (covalent radius) 分别为 124 pm 和 160 pm, Ti 的存在可能改变了界面处的局部应变, 因此使 Sn 聚集在 NiGeSn/GeSn 的界面处.

### 4.3 微波退火和快速热退火的比较

微波退火和快速热退火都是通过电磁波来加热样品, 根据 Hu<sup>[25]</sup> 的研究结果表明, 微波退火和快速热退火的差别在于加热过程中电导损耗和电介质损耗对材料加热的选择性.

在电导损耗方面, 由于快速热退火所用的电磁波的频率范围为  $7.5 \times 10^{13}$ — $3.75 \times 10^{14}$  Hz, 而在此频率范围内 Ni 的电导率小于其静态电导率, 进而 Ni 在快速热退火条件下的加热速率会进一步减小, 可能低于衬底 GeSn 的加热速率. 而微波退火是用较低频率的电磁波来加热, 对 Ni 加热的速率要大于对衬底 GeSn 加热的速率.

在电介质损耗方面, 使用快速热退火的加热方式电介质可以忽略. 在使用微波退火时, 由于偶极子取向极化带来的复介电常数十分明显, 因此对应的介质损耗也非常明显, 体现了微波退火对样品加热的电介质损耗选择性. 无论是电导率损耗, 还是介质损耗微波退火都显示出较好的选择性, 从而可以降低热预算. 另外, 由于微波退火加热速率快的特点<sup>[26]</sup>, Ni 原子能够快速的通过 1 nm 的 Ti 插入层与 GeSn 进行反应, 可加快 Ni 与 GeSn 的反应速度.

## 5 结 论

本文研究了微波退火和快速退火条件下, 1 nm Ti 作插入层调制高 Sn(8%) 含量的 GeSn 与 Ni 的固相反应. 与快速热退火相比, 微波退火条件下生成连续平整的 NiGeSn 薄膜时所需的退火温度更低、生成的 NiGeSn 薄膜更厚. 通过分析微波退火和快速热退火下样品的元素分布, 结果表明 Ni 通过 Ti 插入层与 GeSn 进行反应, Ti 在

反应中起到了调制的作用, Ti 原子最终分布在 NiGeSn 薄膜的表面, Sn 原子主要分布在 NiGeSn/GeSn 的界面. 本研究结果对基于 GeSn 材料的电子和光学器件制备, 有一定的参考意义.

### 参考文献

- [1] Wang P P 1978 *IEEE Trans. Electron. Devices* **25** 779
- [2] Wang H J, Liu Y, Liu M S, Zhang Q F, Zhang C F, Ma X H, Zhang J C, Hao Y, Han G Q 2015 *Superlattices Microstruct.* **83** 401
- [3] Liu Q, Cai J H, He J Z, Wang Y Z, Zhang D L, Liu C, Ren W, Yu W J, Liu X K, Zhao Q T 2017 *J. Infrared Millimeter Waves* **36** 543
- [4] Zhang L, Wang Y S, Chen N L, Lin G Y, Li C, Huang W, Chen S Y, Xu J F, Wang J Y 2016 *J. Non-Cryst. Solids* **448** 74
- [5] Onufrijevs P, Ščajev P, Medvids A, Andrulevicius M, Nargelas S, Malinauskas T, Stanionyte S, Skapas M, Grase L, Pludons A, Oehme M, Lyutovich K, Kasper E, Schulze J, Cheng H H 2020 *Opt. Laser Technol.* **128** 106200
- [6] Han G Q, Su S J, Zhan C L, Zhou Q, Yang Y, Wang L X, Guo P F, Wong C P, Shen Z X, Cheng B W, Yeo Y C 2011 *IEEE International Electron Devices Meeting* Washington, DC Dec 05–07, 2011 p402
- [7] Wang L X, Su S J, Wang W, Gong X, Yang Y, Guo P F, Zhang G Z, Xue C L, Cheng B W, Han G Q, Yeo Y C 2013 *Solid-State Electron.* **83** 66
- [8] Li H, Cheng H H, Lee L C, Lee C P, Su L H, Suen Y W 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 241904
- [9] Demeulemeester J, Schrauwen A, Nakatsuka O, Zaima S, Adachi M, Shimura Y, Comrie C M, Fleischmann C, Detavernier C, Temst K, Vantomme A 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 211905
- [10] Nishimura T, Nakatsuka O, Shimura Y, Takeuchi S, Vincent B, Vantomme A, Dekoster J, Caymax M, Loo R, Zaima S 2011 *Solid-State Electron.* **60** 46
- [11] Liu Y, Wang H J, Yan J, Han G Q 2014 *ECS Solid State Lett.* **3** 11
- [12] Wan W J, Ren W, Meng X R, Ping Y X, Wei X, Xue Z Y, Yu W J, Zhang M, Di Z F, Zhang B 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 056802
- [13] Khiangte K R, Rathore J S, Sharma V, Laha A, Mahapatra S 2018 *Solid State Commun.* **284–286** 88
- [14] Meng X R, Ping Y X, Chang Y W, Wei X, Yu W J, Xue Z Y, Di Z F, Zhang M, Zhang B 2015 *J. Funct. Mater. Devices* **21** 85 (in Chinese) [孟骁然, 平云霞, 常永伟, 魏星, 俞文杰, 薛忠营, 狄增峰, 张苗, 张波 2015 功能材料与器件学报 **21** 85]
- [15] Huang W Q, Cheng B W, Xue C L, Liu Z 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 165704
- [16] Lan H S, Chang S T, Liu C W 2017 *Phys. Rev. B* **95** 201201
- [17] Wirths S, Geiger R, Driesch N V D, Mussler G, Stoica T, Mantl S, Lkonic Z, Luysberg M, Chiussi S, Hartmann J M, Sigg H, Faist J, Buca D, Grützmacher D 2015 *Nat. Photonics* **9** 88
- [18] Yi S H, Shu K, Liao C, Hsu C W, Huang J Y 2018 *IEEE Electron. Device Lett.* **39** 1278
- [19] Liu T H, Chiu P Y, Chuang Y, Liu C Y, Shen C H, Luo G L, Li J Y 2018 *IEEE Electron. Device Lett.* **39** 468
- [20] Quintero A, Gergaud P, Hartmann J M, Delaye V, Bernier N,

- Cooper D, Saghi Z, Reboud V, Cassan E, Rodriguez P 2020 *ECS Trans.* **98** 365
- [21] Zhang X, Zhang D L, Zheng J, Liu Z, He C, Xue C L, Zhang G Z, Li C B, Cheng B W, Wang Q M, 2015 *Solid-State Electron.* **114** 178
- [22] Quintero A, Gergaud P, Hartmann J M, Reboud V, Cassan E, Rodriguez P 2020 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **108** 104890
- [23] Ping Y X, Hou C L, Zhang C M, Yu W J, Xue Z Y, Wei X, Peng W, Di Z F, Zhang M, Zhang B 2017 *J. Alloys Compd.* **693** 527
- [24] Takeuchi S, Sakai A, Nakatsuka O, Ogawa M, Zaima S 2008 *Thin Solid Films* **517** 159
- [25] Hu C 2013 *M. S. Thesis* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [胡成 2013 硕士学位论文 (上海: 复旦大学)]
- [26] Zhou X B, Xu P, Fu C C, Wu D P 2016 *Semicond. Technol.* **41** 456 (in Chinese) [周祥标, 许鹏, 付超超, 吴东平 2016 半导体技术 **41** 456]

## Reaction of titanium-modulated nickel with germanium-tin under microwave and rapid thermal annealing\*

Liu Wei<sup>1)2)</sup> Ping Yun-Xia<sup>1)†</sup> Yang Jun<sup>1)2)</sup> Xue Zhong-Ying<sup>2)</sup> Wei Xing<sup>2)</sup>  
Wu Ai-Min<sup>2)</sup> Yu Wen-Jie<sup>2)</sup> Zhang Bo<sup>2)‡</sup>

1) (*School of Mathematics and Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China*)

2) (*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

( Received 14 December 2020; revised manuscript received 7 January 2021 )

### Abstract

As the complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) compatible with group IV materials, germanium tin (GeSn) alloys have potential applications in photonics and microelectronics. With the increase of tin (Sn) content, GeSn alloys can change from indirect bandgap semiconductor to direct bandgap semiconductor. On the other hand, GeSn alloys have a higher hole mobility than Ge and can be used as channel materials in metal-oxide-semiconductor-field-effect transistors (MOSFETs). Therefore, the properties of GeSn alloys are studied extensively. In this work, the solid-phase reaction between Ni and GeSn is investigated under microwave annealing (MWA) and rapid thermal annealing (RTA) conditions. We use the four-point probe method to measure the sheet resistance, the atomic force microscopy (AFM) to examine the surface morphology of the sample, the cross-section transmission electron microscopy (XTEM) to analyze the microstructures of the metal stanogermanides, and energy dispersive X-ray spectrometer (EDX) to observe the elements' distribution of different samples. It is shown that the flat Nickel stanogermanide (NiGeSn) films are obtained at 300 °C for MWA and at 350 °C for RTA. By analyzing the distributions of sample elements, we find that Sn atoms continue to diffuse into the NiGeSn layer and are segregate mainly at the interface between NiGeSn and GeSn. However, the Ti atoms move from interlayer to the surface after being annealed. We propose that this method is a promising way of developing GeSn devices in the future.

**Keywords:** microwave annealing, rapid thermal annealing, germanium tin alloy, Ti interlayer

**PACS:** 68.60.Dv, 68.35.Ct, 68.55.J-, 68.37.-d

**DOI:** 10.7498/aps.70.20202118

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61604094).

† Corresponding author. E-mail: [xyping@sues.edu.cn](mailto:xyping@sues.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [bozhang@mail.sim.ac.cn](mailto:bozhang@mail.sim.ac.cn)