

# Microstructure and Magnetic Properties of Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> Thin Films on Cast Mono-Silicon Substrates

Yu Wang<sup>1\*</sup>, Shuai Zou<sup>1,2\*</sup>, Sicheng Xu<sup>1</sup>, Qishan Zhu<sup>1</sup>, Bin Peng<sup>3</sup>, Wanli Zhang<sup>3</sup>, Rujun Tang<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory of Thin Films, School of Physical Science and Technology, Soochow University, Soochow Jiangsu

<sup>2</sup>Canadian Solar Inc., Soochow Jiangsu

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan

Email: #tangrj@suda.edu.cn

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jun. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 25<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

In this paper, the microstructure and magnetic properties of Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> films deposited on cast mono-silicon substrates (CM-Si) were investigated. The results show that the surface morphology of Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> films is consistent with the surface morphology of the CM-Si. The coercivity and remanence ratio increase with increasing Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> thickness. When the thickness of Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> is larger than 40 nm, the coercivity and remanence ratio are saturated. The magnetic properties of the annealed film are almost same as that of as-deposited film. This indicates that the magnetic properties of the film are mainly determined by the surface microstructure of the substrate rather than the fabrication conditions. The above results may contribute to a better integration of the Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> film on the CM-Si devices.

## Keywords

Cast Mono-Silicon, NiFe, Magnetic Properties

# 生长在类单晶硅片上的Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>薄膜的微结构和磁性能研究

王禹<sup>1\*</sup>, 邹帅<sup>1,2\*</sup>, 徐思晨<sup>1</sup>, 朱齐山<sup>1</sup>, 彭斌<sup>3</sup>, 张万里<sup>3</sup>, 汤如俊<sup>1#</sup>

\*相同贡献

#通讯作者。

文章引用: 王禹, 邹帅, 徐思晨, 朱齐山, 彭斌, 张万里, 汤如俊. 生长在类单晶硅片上的 Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> 薄膜的微结构和磁性能研究[J]. 应用物理, 2019, 9(6): 300-304. DOI: 10.12677/app.2019.96036

<sup>1</sup>苏州大学物理科学与技术学院, 江苏省薄膜重点实验室, 江苏 苏州

<sup>2</sup>加拿大太阳能公司, 江苏 苏州

<sup>3</sup>电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都

Email: [tangrj@suda.edu.cn](mailto:tangrj@suda.edu.cn)

收稿日期: 2019年6月5日; 录用日期: 2019年6月18日; 发布日期: 2019年6月25日

## 摘要

本文研究了生长在类单晶硅片上 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 薄膜的微观结构和磁学性能。结果表明 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 的表面形貌与类单晶硅片的表面形貌一致, 具有高度的织构取向。 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 的矫顽力与剩磁比随薄膜厚度的增加而增加。其厚度达到40 nm后, 其矫顽力与剩磁比达到饱和。对薄膜进一步的真空退火的结果显示薄膜的磁性无显著变化, 这表明其磁性主要由基板的表面微结构而不是制备条件决定。上述结果有助于在类单晶硅器件上更好地集成 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 薄膜。

## 关键词

类单晶硅片, NiFe, 磁性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

坡莫合金( $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ , 简称 NiFe)是优异的软磁材料, 并且具有大的各向异性磁阻(AMR)振幅[1]。NiFe 已广泛被应用于 AMR 传感器等许多磁性器件中。在过去的研究中, NiFe 薄膜一般生长在高质量的单晶硅片表面[1] [2] [3] [4]。而在太阳能电池行业中, 低成本的多晶硅和类单晶硅(Cast mono-silicon, CM-Si) 则被广泛采用[5]。与单晶硅相比, 多晶硅和 CM-Si 则拥有更多的晶界。同时, CM-Si 还具有类似单晶硅的晶体高度择优取向。随着信息技术的快速发展, 功能器件的集成密度需要越来越高[6]。如果将磁性薄膜和器件直接集成在太阳能电池器件的表面上, 则可以减小器件系统尺寸并使其拥有更多功能[7]。但是, 到目前为止, NiFe 薄膜在太阳能电池所用多晶硅和类单晶硅表面上的生长机制和磁学性能尚未得知。

本文在平面的 CM-Si 上生长了不同 NiFe 厚度的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜, 并对薄膜微观结构和磁性能进行了研究。三层薄膜中底部 Ta 层设计为过渡层, 以便更好地生长 NiFe 磁性层。顶部 Ta 层用于保护 NiFe 层在空气中免受氧化。

## 2. 实验方法

我们通过脉冲激光沉积(PLD, Lambda Physik, 248 nm 激光)在(100)取向的 CM-Si 衬底上制备了 Ta (40 nm)/NiFe (x)/Ta (40 nm)三层薄膜, 其中 NiFe 层的厚度 x 分别为 12 nm, 30 nm, 60 nm, 90 nm 和 120 nm。使用的是高纯度(99.99%)  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  和 Ta 合金靶进行沉积。薄膜的沉积速率为 3 nm/min。所有 CM-Si 基板均从太阳能公司购得。薄膜在室温下真空度小于  $1 \times 10^{-4}$  Pa 条件下进行沉积, 所用激光频率和能量分别为 5 Hz 和  $0.45 \text{ J/cm}^2$ 。在薄膜生长完成后, 将部分在真空中  $350^\circ\text{C}$  下进一步后退火以进行比较。通过 X

射线衍射(XRD, Rigaku D-Max 2000PC)和扫描电子显微镜(SEM, S-4800)测量所有样品的成相和微观结构。在综合物性测量系统(PPMS-9, Quantum Design)中使用振动样品磁强计(VSM)进行磁学测量。

### 3. 结果与分析

图 1 是在平面 CM-Si 基底上的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的 XRD 结果。结果表明,在室温下沉积薄膜时,不能观察到 Ta 薄膜的峰,但可以在  $44.5^\circ$  观察到弱的 NiFe (111)峰。图 2 是在不同厚度的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的 SEM 表面和横截面图像。薄膜的磁性/非磁性层三层结构可以从图 2(a)中的横截面图像中清晰看到。图 2(b)~(d)为薄膜的表面图像,对于沉积在平坦表面上的三层薄膜,可以清楚地看到薄膜表面的纹理。这种纹理化的表面是将类单晶 Si 片经过化学处理所形成的绒面。这种有纹理的表面形貌结构可能导致其上的 NiFe 薄膜与平整单晶硅衬底上的 NiFe 薄膜的磁性有所不同[4]。

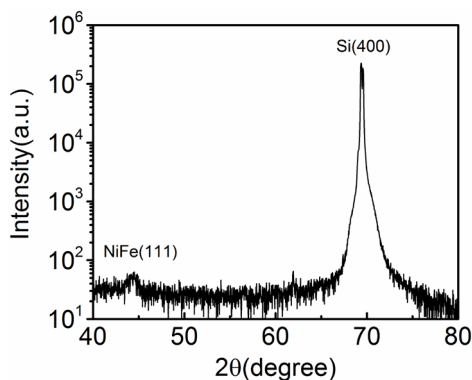


Figure 1. XRD  $\theta$ - $2\theta$  spectrum of Ta/NiFe/Ta tri-layer film on flat CM-Si substrate

图 1. 平面 CM-Si 基底上的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的 XRD 结果

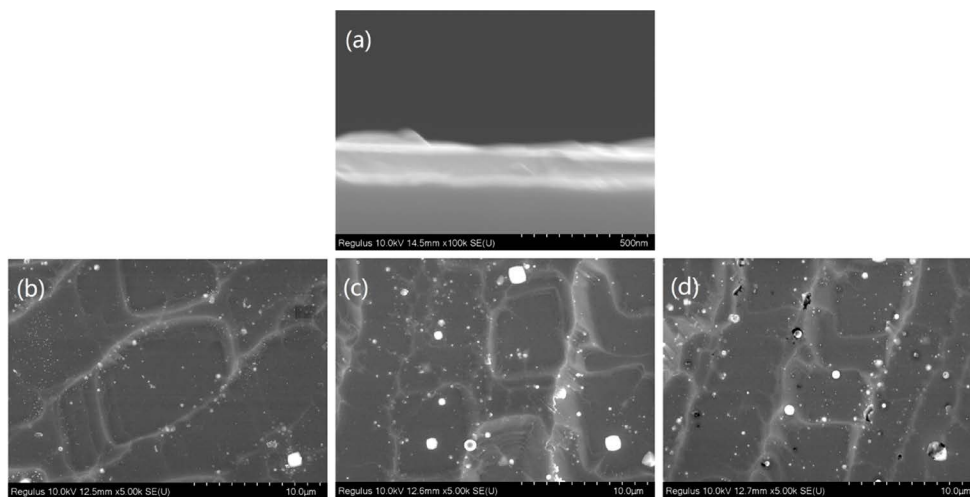
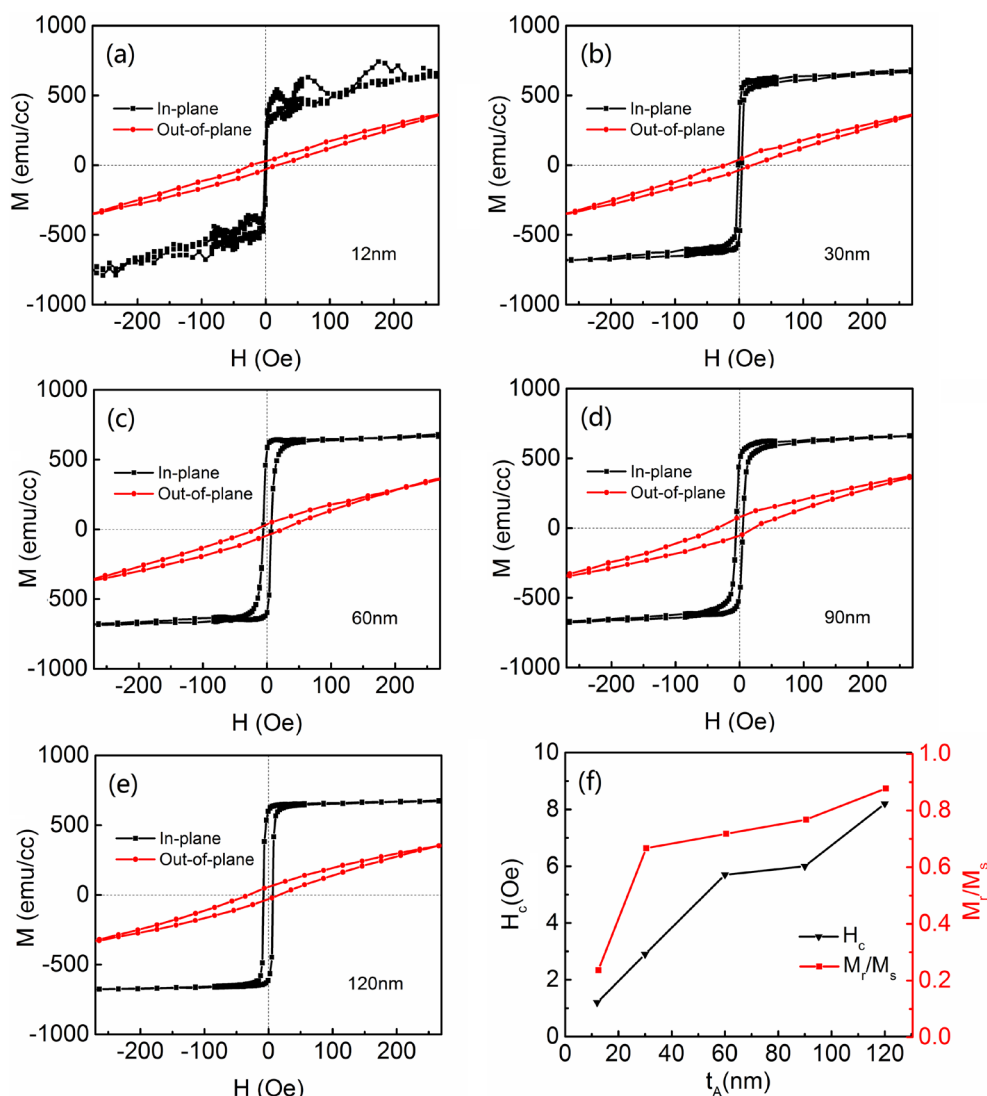


Figure 2. (a) Cross-sectional SEM image of sample with a NiFe thickness of 90 nm, (b), (c), and (d) are surface SEM images of samples with NiFe thicknesses of 30 nm, 90 nm and 120 nm, respectively

图 2. (a) 为 NiFe 厚度 90 nm 的薄膜 SEM 横截面图像; (b), (c), (d) 分别是 NiFe 厚度为 30 nm, 90 nm 和 120 nm 的 SEM 表面图像

图 3 是在平面的 CM-Si 基底上的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的磁滞回线。图 3(a)~(e)分别是 12 nm, 30 nm, 60 nm, 90 nm 和 120 nm NiFe 厚度的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的面内面外磁滞回线对比,其面内磁滞回线是典型的具有软磁特性的 NiFe 薄膜[8]。面内和面外磁滞回线之间的差别表明易磁化轴位于薄膜面内。图 3(f)

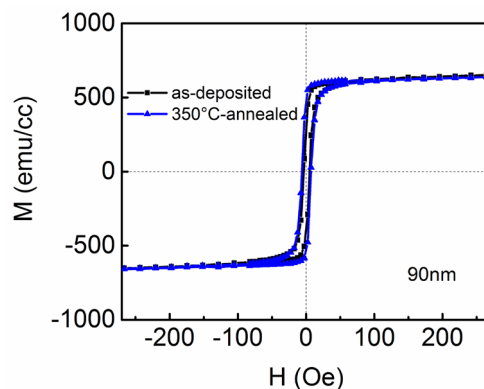
总结了不同 NiFe 厚度的矫顽力  $H_c$  和剩磁比。在 NiFe 厚度低于 40 nm 时  $H_c$  和剩磁比随着膜厚度增大而增加, 在高于 40 nm 后饱和。据报道, 对于沉积在 Ta 底层或直接在单晶 Si 衬底上的 NiFe 薄膜, 存在高达几纳米的磁性死层[8]。CM-Si 衬底的表面比单晶 Si 衬底的表面粗糙。粗糙的基底表面可以阻挡入射原子的长程扩散, 这不利于成膜时的结晶。这会增加磁性死层的厚度并产生畴壁运动的钉扎中心。因此, 当膜厚度小时, CM-Si 基底上的磁性 NiFe 膜将与厚度相关。随着 NiFe 厚度的增加, NiFe 磁性死层所占体积比将减小, 因此, 当薄膜足够厚时, NiFe 薄膜的磁性能会饱和。



**Figure 3.** (a)~(e) show the in-plane and out-of-plane hysteresis loops of Ta/NiFe/Ta tri-layer films with NiFe thicknesses of 12 nm, 30 nm, 60 nm, 90 nm and 120 nm, respectively, (f) is the NiFe thickness dependent in-plane coercivity  $H_c$  and remanence ratios  $M_r/M_s$ .

**图 3.** (a)~(e)分别是 12 nm, 30 nm, 60 nm, 90 nm 和 120 nm NiFe 厚度的 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的面内面外磁滞回线对比; (f)总结了不同 NiFe 厚度的面内矫顽力  $H_c$  和面内剩磁比

为了明白 CM-Si 衬底上的 Ta/NiFe/Ta 薄膜的磁性能是否依赖于制备条件, 本文将制备态的 Ta/NiFe/Ta 薄膜进一步在真空环境中在 350 度下后退火 1 小时。图 4 表明后退火没有导致薄膜磁性能的显著变化。由此可见, 薄膜的磁性主要由 CM-Si 衬底的表面微结构决定。



**Figure 4.** Hysteresis loops of sample with NiFe thickness of 90 nm in the states of (a) as-deposited and (b) annealed at 350°C for 1 hour

**图 4.** NiFe 厚度为 90 nm 的薄膜在 350 度下后退火 1 小时的磁滞回线对比图

#### 4. 总结

本文研究了生长在类单晶硅片上 Ta/NiFe/Ta 三层薄膜的微观结构和磁学性能。结果表明 NiFe 的表面形貌与类单晶硅片的表面形貌一致，具有高度的织构取向。NiFe 的矫顽力与剩磁比随薄膜厚度的增加而增加。其厚度达到 40 nm 后，其矫顽力与剩磁比达到饱和。对薄膜进一步的真空退火的结果显示薄膜的磁性无显著变化，这表明其磁性主要由基板的表面微结构而不是制备条件决定。上述结果有助于在类单晶硅器件上更好地集成 NiFe 薄膜。

#### 致 谢

本论文感谢科技部国家重点研发计划项目(No. 2017YFB0406401)的支持。

#### 参考文献

- [1] Leng, Q.W., Leng, H., Mao, M., Hiner, C. and Ryan, F. (2000) Magnetic Dead Layers in NiFe/Ta and NiFe/Si/Diamond-Like Carbon Films. *Journal of Applied Physics*, **87**, 6621-6623. <https://doi.org/10.1063/1.372790>
- [2] Volkerts, J.P. (2012) *Magnetic Thin Films: Properties, Performance, and Applications*. Nova Science Publishers Inc., Hauppauge.
- [3] Kim, J., Sheng, P., Takahashi, S., Mitani, S.J. and Hayashi, M. (2016) Spin Hall Magnetoresistance in Metallic Bilayers. *Physical Review Letters*, **116**, Article ID: 097201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.097201>
- [4] Zhang, W.X., Peng, B., Han, F.B., Wang, Q.R., Soh, W.T., Ong, C.K. and Zhang, W.L. (2016) Separating Inverse Spin Hall Voltage and Spin Rectification Voltage by Inverting Spin Injection Direction. *Applied Physics Letters*, **108**, Article ID: 102405. <https://doi.org/10.1063/1.4943517>
- [5] Zou, S., Ye, X.Y., Wu, C.K., Cheng, K.X., Fang, L., Tang, R.J., Shen, M.R., Wang, X.S. and Su, X.D. (2019) Complementary Etching Behavior of Alkali, Metal-Catalyzed Chemical, and Post-Etching of Multicrystalline Silicon Wafers. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **27**, 511-519. <https://doi.org/10.1002/pip.3125>
- [6] Masahiro, Y., Wataru, K. and Yasushi, E. (2012) On-Chip Intra Decoupling Measurements for Integrated Magnetic Thin Film. *IEEE Transactions on Magnetics*, **48**, 4394-4397. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2208221>
- [7] Fathabadi, H. (2018) Effect of External AC Electric and Magnetic Fields on the Power Production of a Silicon Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **8**, 1408-1412. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2860946>
- [8] Leng, Q.W., Han, H., Mao, M., Hiner, C. and Ryan, F. (2000) Magnetic Dead Layers in NiFe/Ta and NiFe/Si/Diamond-Like Carbon Films. *Journal of Applied Physics*, **87**, 6621-6623. <https://doi.org/10.1063/1.372790>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)