

退火温度对嵌入 Si 中的 γ -FeSi₂ 颗粒发光的影响^{*}

李 成[†] 赖虹凯 陈松岩

(厦门大学物理系, 半导体光子学研究中心, 厦门 361005)

摘要: 研究了退火温度对分子束外延(MBE)方法生长的 Si 基 γ -FeSi₂ 颗粒的发光性质和电学特性的影响. 结果表明, 在 900 °C 下退火的样品, 虽然 γ -FeSi₂ 的结晶质量有所提高, 但是由于晶格失配和热膨胀系数的不同, 在 Si 中引入位错, 导致样品的光致发光谱展宽和形成的二极管漏电流增大. 而在 800 °C 下退火的样品, 具有较低的漏电流和较强的室温电致发光谱.

关键词: γ -FeSi₂; 光致发光; 退火

PACC: 7280J; 7860F; 7940

中图分类号: TN304.1^{†2}

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)01-0082-04

1 引言

硅基材料是微电子电路的基石, 但由于它的间接带隙特性, 发光效率非常低, 因此在光电子器件应用上有着很大的局限性, 与 III-V 族材料相比处于劣势地位. 然而随着材料科学的发展和生长设备的提高, 通过物性改造如能带工程、纳米工程、硅的化合物等方法改变硅基材料在光电子领域的被动局面成为可能. 因此探索可与硅基微电子电路实现单片集成的硅基光电子器件再次成为近年来的研究热点. 目前已经在硅基发光材料与器件的研究上取得了一系列成果, 如硅基喇曼激光器、含有位错的发光硅材料以及 γ -FeSi₂ 发光二极管等^[1~4].

退火工艺常用来减少晶体缺陷、提高晶体质量. γ -FeSi₂ 被认为是一种具有竞争力的 Si 基半导体发光材料. γ -FeSi₂ 材料在适当的应变条件下具有直接带隙特性, 禁带宽度约 0.8 eV, 因此是制作光通信用的硅基发光器件的材料之一. 在硅基上实现高质量 γ -FeSi₂ 的生长主要有两种方法, 其一是在硅衬底上注入 Fe 离子, 通过退火在硅中形成 γ -FeSi₂ 颗粒^[5,6]; 另一种方法是在适当的条件下用分子束外延(MBE)方法直接在硅衬底上外延 γ -FeSi₂ 薄膜^[7~9]. 不论哪种方法制备 γ -FeSi₂, 退火都是形成高质量晶体的重要手段, 它直接影响到其发光特性和电学性能. 基于此, 本文研究了 MBE 方法生长的 γ -FeSi₂ 在 800 °C 和 900 °C 下退火 14h 后对材料的发光特性和电学性能的影响. 当退火温度高于 930

时, 将形成具有金属特性的 γ -FeSi₂, 已超出本文研究范围.

2 嵌入 Si 中的 γ -FeSi₂ 颗粒样品的制备

采用 n 型 Si(100) 衬底外延, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 生长前 Si 衬底在丙酮和乙醇中各超声 10min, 去离子水中超声 5min. 然后用标准 RCA 方法清洗, 在 Si 表面形成一层氧化硅保护层. 在生长室中 850 °C 加热 30min, 脱去氧化层, 观察到 Si 表面 2×1 再构 Rheed 图样. 将衬底温度降到 470 °C, 电子束蒸发 10nm 厚 γ -FeSi₂ 薄膜, 在 850 °C 真空条件下退火 1h, 使 γ -FeSi₂ 成岛. 然后在 500 °C 下生长 400nm 厚本征 Si 层和 700 °C 下生长 700nm 掺 B Si 层, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 形成二极管结构. 最后将样品分割成两部分, 在氩气氛中, 分别在 800 °C 和 900 °C 下退火 14h.

用标准光刻工艺和化学腐蚀方法制作成 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 台面结构发光二极管, n 型 Si 接触用叉指状铝电极, 而在 p 型 Si 背面用 AuSb 合金做电极. 在做成器件前, 测试了样品的变温光致发光谱. 激发光源为 422nm He-Cd 激光器, 温度范围从 8 K 到 300 K. 电致发光谱的测量使用频率 200 Hz、占空比为 1/2 的脉冲电流源. 发光谱的记录用 25cm 的单色仪和液氮冷却的 InP/InGaAs 光电探测器和锁相放大器来实现.

^{*}福建省青年科技人才创新(批准号:2004J021)和集成光电子学国家重点实验室半导体所开放课题资助项目

[†]通信作者. Email:lich@xmu.edu.cn

2005-08-05 收到, 2005-09-19 定稿

3 结果和讨论

在 800 和 900 K 下退火 14h 后的样品变温光致发光谱如图 1 所示,两个样品在 0.81eV 处有一强的发光峰位.800 K 下退火样品的谱线宽度远小于 900 K 下退火的样品,而且在 900 K 下退火后的样品

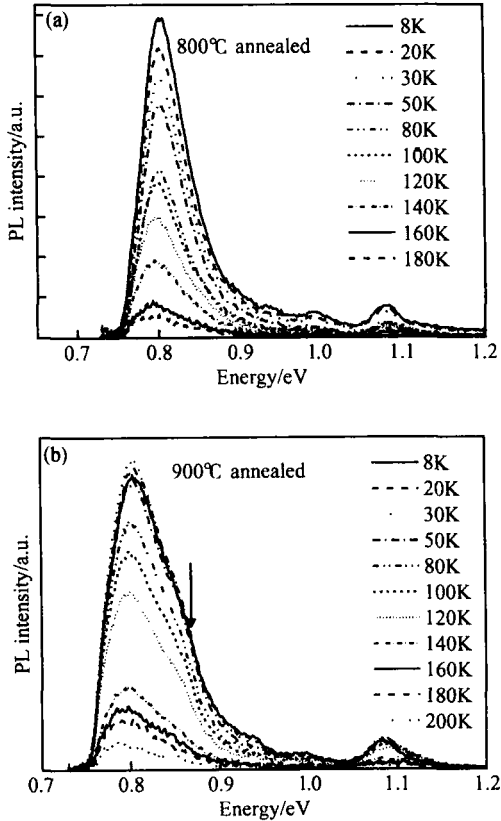


图 1 800 (a) 和 900 (b) 下退火后样品的光致发光谱随温度的变化.900 K 下退火的样品光致发光谱有明显的展宽
Fig. 1 PL spectra of samples annealed at 800 (a) and 900 (b), respectively

在 0.87eV 处有一个明显的峰位(“肩膀”).众所周知,在 Si 中与缺陷相关的发光峰位有 D1 (0.807eV),D2 (0.87eV),D3 (0.935eV) 和 D4 (0.997eV),而 D1 和 D2 峰位通常同时出现^[10].这一结果表明,900 K 下退火在样品的 Si 中引入了发光缺陷.因此发光谱中除了 -FeSi₂ 的发光外,还包含了 Si 中与缺陷相关的 D1/D2 峰.而 800 K 下退火的样品主要是 -FeSi₂ 的发光.随着测试温度的升高,样品的发光强度逐渐降低,在温度升高到 140 K 以后,900 K 下退火样品的 PL 谱在 0.87eV 附近的峰位消失,其半高宽变窄,与 800 K 下退火样品的 PL 谱半高宽接近,说明温度升高到 140 K 后,Si 中缺陷发光 D1 和 D2 线的贡献减小,这与 Si 中缺陷发光淬灭较快的特点相符.此外我们发现,在低温下

(< 50 K),900 K 退火样品的 PL 谱强度随温度的升高而略有升高,造成该结果的原因目前还不是很清楚,我们认为可能与 Si 中存在缺陷的发光有关.

图 2 给出了光致发光谱的积分强度随温度的变化关系.900 K 下退火的样品积分强度随温度的淬灭变得缓慢,其原因一方面是高温下退火 -FeSi₂ 的结晶质量提高,在 -FeSi₂ 中的非辐射复合中心减少,另外在温度不太高时该积分强度也包含了 Si 中缺陷发光 D1 和 D2 的贡献.

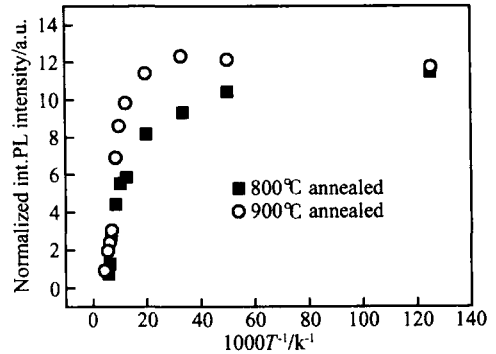


图 2 光致发光积分强度对温度的依存性
Fig. 2 Dependence of integrated PL intensity on temperature

台面结构二极管的电流-电压特性如图 3 所示.可以看出,900 K 下退火样品的正反向电流都增大.900 K 下退火样品的平面透射电子显微照片示于图 4.在 -FeSi₂ 颗粒附近可以观察到位错线的存在.-FeSi₂ 颗粒分布于 Si pn 结界面,二极管的电流包括两部分,其中一部分电流通过 Si-FeSi₂ 颗粒形成的异质结;另一部分电流通过 Si pn 结.漏电流的增加主要是通过 Si pn 结中位错线的存在而引起的复合电流.

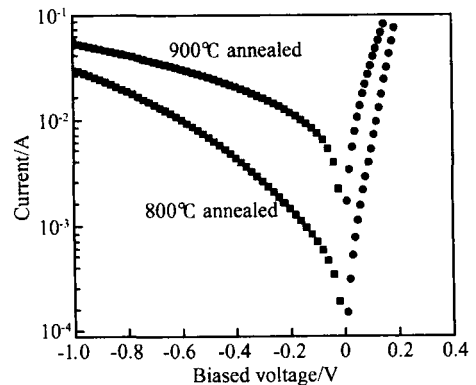


图 3 800 和 900 K 下退火样品制备的发光二极管的 I-V 特性比较
Fig. 3 Current-voltage characteristics of samples annealed at 800 K and 900 K

两个样品在室温下的电致发光谱示于图 5 中,电流密度为 89A/cm².800 K 下退火样品的电致发

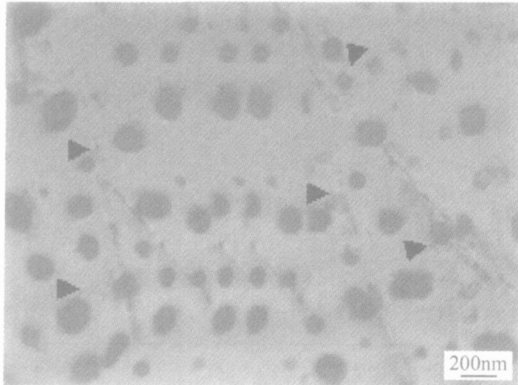


图 4 900 °C 下退火样品的平面透射电子显微照片。在 -FeSi_2 颗粒界面可观察到位错线的存在(如箭头所示)

Fig. 4 Plan view TEM images of samples annealed at 900 °C

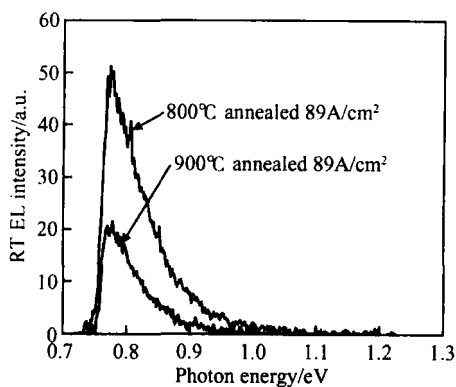


图 5 室温下 800 °C 和 900 °C 退火样品制备的发光二极管电致发光谱

Fig. 5 Room temperature EL spectra of samples annealed at 800 °C and 900 °C

光强度远大于 900 °C 下退火样品的强度。在室温下, 900 °C 退火样品在 Si 中形成的缺陷, 消耗掉部分注入的载流子, 使得发光强度降低。

4 结论

通过对 800 °C 和 900 °C 下退火的 -FeSi_2 样品的

发光谱和电学特性的比较, 表明 900 °C 下退火虽然对材料的结晶质量有所提高, 但是同时在 -FeSi_2 与 Si 的界面引入位错, 从而使光致发光谱展宽和二极管漏电流增大。而 800 °C 下退火样品的室温电致发光强度比 900 °C 下退火样品有较大的提高。

参考文献

- [1] Rong H, Jones R, Liu A, et al. A continuous-wave Raman silicon laser. *Nature*, 2005, 433: 725
- [2] Hirschman K D, Tysbekov L, Duttagupta S P, et al. Silicon-based visible light-emitting devices integrated into microelectronic circuits. *Nature*, 1996, 384: 338
- [3] Leong D N, Harry M A, Reeson K J, et al. A silicon/iron-disilicide light emitting diode operating at a wavelength of 1.5 μm . *Nature*, 1997, 387: 686
- [4] Suemasu T, Negishi Y, Takakura K, et al. Room temperature 1.6 μm electroluminescence from a Si-based light emitting diode with -FeSi_2 active region. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 39 (Part 2): L1013
- [5] Grimaldi M G, Spinella C, Coffa S, et al. Origin and perspectives of the 1.54 μm luminescence from ion-beam synthesized -FeSi_2 precipitates in Si. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 173
- [6] Yang Z, Homewood K P, Finney M S, et al. Optical absorption study of ion beam synthesized polycrystalline semiconducting -FeSi_2 . *J Appl Phys*, 1995, 78: 1958
- [7] Suemasu T, Negishi Y, Takakura K, et al. Influence of Si growth temperature for embedding -FeSi_2 and resultant strain in -FeSi_2 on light emission from p⁻Si/ -FeSi_2 particles/n-Si light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 1804
- [8] Li C, Suemasu T, Hasegawa F. Room-temperature electroluminescence of Si-based p⁻i-n diode with -FeSi_2 particles embedded in the intrinsic silicon. *J Appl Phys*, 2005, 97: 043529
- [9] Li C, Suemasu T, Hasegawa F. Measurements of carrier confinement at -FeSi_2 -Si heterojunction by electroluminescence. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(2): 230
- [10] Sauer R, Weber J, Stolz J, et al. Dislocation-related photoluminescence in silicon. *Appl Phys A*, 1985, 36: 1

Influence of Annealing Temperature on Luminescence of γ -FeSi₂ Particles Embedded in Silicon^{*}

Li Cheng[†], Lai Hongkai, and Chen Songyan

(Research Center for Semiconductor Photonics, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract : The influence of annealing temperature on the luminescence and electrical properties of γ -FeSi₂ particles embedded in silicon is investigated. The experimental results indicate that annealing at 900 °C improves the particles' crystal quality, but dislocations are introduced in the silicon due to the thermal and lattice mismatches, which broaden the photoluminescence spectrum and enlarge the leakage current. Stronger room temperature electroluminescence is obtained from the sample annealed at 800 °C.

Key words : γ -FeSi₂; photoluminescence; thermal annealing temperature

PACC : 7280J; 7860F; 7940

Article ID : 0253-4177(2006)01-0082-04

^{*}Project supported by the Creative Projects for Young Scientific Researchers of Fujian Province (No. 2004J021) and the Foundation of State Key Laboratories

[†]Corresponding author. Email: lich@xmu.edu.cn

Received 5 August 2005, revised manuscript received 19 September 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics