

# $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜制备与发光研究的进展

朱放,肖志松,周博,燕路,张峰,黄安平

(北京航空航天大学物理系,北京 100191)

**摘要:**过渡金属硅化物  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 因其原料价格低廉且利于环保而成为理想的硅基发光材料之一。探讨了  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的发光机理,介绍了几种  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜制备方法并比较了不同制备方法的特点,总结了最近几年来  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的研究进展和主要研究成果。结合作者已经取得的结果和积累的经验,提出了提高材料发光性能方法,认为良好的结晶质量和尽可能减少缺陷是  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 高效发光的基础,因此有必要探索新的制备方法并改善已有的制备工艺。另外,尝试在  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜中应用其它元素,也有可能增大发光效率;而有效激发  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的 p-i-n 结构也是提高发光效率的方法之一。最后,讨论了  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的发展趋势,展望了该种材料的发展前景。

**关键词:**  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜;薄膜制备;硅基发光材料;光电集成

中图分类号:TN304.055; O482.31 文献标识码:A

## Progress in preparation and luminescence of $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films

ZHU Fang, XIAO Zhi-song, ZHOU Bo, YAN Lu, ZHANG Feng, HUANG An-ping

(Department of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Iron disilicide ( $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>) is a promising material due to its advantages of abundant raw materials and environmentally-friendly. This paper introduces the luminescent mechanism of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>, and discusses several kinds of preparing methods for  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films. Then, the development and research achievements of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films are described in detail. On the basis of achievements above and experiences by authors, it emphasizes that the good crystallized quality and the fewest possible crystal defect are the fundament for high effective luminescence, so that it is necessary for  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films to explore new preparing methods and to improve traditional growth technologies. Furthermore, doping new elements appropriately into the  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films and exciting p-i-n structures effectively for  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films will be the research focuses further. Finally, this paper reviews the general developing trends and prospects for  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films.

**Key words:**  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin film; thin film preparation; silicon-based luminescent materials; optoelectronic integration

收稿日期:2009-01-29;修订日期:2009-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10604003);北京市科技新星计划资助项目(No. 2006B15);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-07-0045);航空科学基金资助项目(No. 2008ZC51037)

## 1 引言

硅基发光材料能够充分利用硅集成工业发展起来的较为成熟的各种硅基纳米技术,并实现同硅基芯片的工艺兼容,因此,该材料的发光特性研究已成为光电材料领域的研究热点之一。目前研究较多的硅基发光材料有 SiGe/Si 低维量子阱结构、Er 与纳米晶硅组合发光材料、硅衬底上的磷化铟(InP)和砷化镓(GaAs)等 III-V 族材料以及  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 等。美国国防部已出资 600 万美金支持麻省理工大学在 5 年之内研制出以 SiGe/Si 材料或 Er 与纳米晶硅组合材料为基础的微型激光器<sup>[1]</sup>。

$\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 材料由于其能实现在 1.5 ~ 1.6  $\mu\text{m}$  波段的光致发光和电致发光而倍受关注。相对于其它材料, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 具有以下优势:原材料(Fe、Si)易得且价格低廉;材料无毒且环境负荷低,被称为环保型半导体<sup>[2]</sup>;通过改变  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的制备条件可以在一定范围内调整其发光波长等<sup>[3]</sup>。因此,许多国家对  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的研究兴趣日增,其中兴趣之最当属日本。

本文探讨了  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的发光机理,比较了不同的薄膜制备方法,寻找发光性能改善的途径,并对今后的研究方向做了初步展望。

## 2 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 材料的发光机理

$\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的晶体结构为四方晶体,属 Cmcn 空间群,如图 1 所示。每个原胞中包含 16 个分子(由 32 个 Si 原子和 16 个 Fe 原子构成),同一种类的原子在晶格中的位置存在差异,即存在 Fe I、Fe II、Si I、Si II 原子, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的晶格常数为  $a = 0.9863 \text{ nm}$ ,  $b = 0.7791 \text{ nm}$ ,  $c = 0.7833 \text{ nm}$ ,晶格常数  $b$  和  $c$  的差别较小。

$\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的电子结构属过渡金属  $d$  态。从局域态密度近似和第一原理出发,应用参量平面波和线性轨道耦合方法得到的能量结构表明, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 具有间接带隙<sup>[5]</sup>。价带顶位于  $Y$  点,导带底位于  $A$  线,价带具有类  $d$  轨道性质。通过计算还指出, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的能带结构对晶格常数特别敏感。

到目前为止,仅在  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的薄膜材料中发现

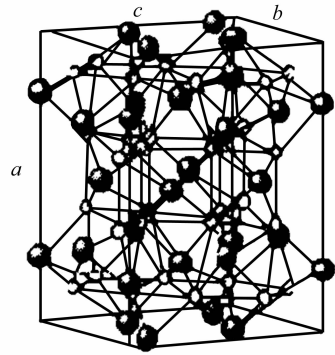


图 1  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 晶体结构为四方晶系<sup>[4]</sup>

由 32 个 Si 原子和 16 个 Fe 原子构成

Fig. 1  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> crystal is tetragonal system formed by 32 Si atoms and 16 Fe atoms<sup>[4]</sup>

光致发光,在体材料中尚未发现。普遍认为体材料是间接带隙材料,外延薄膜由于晶格不匹配、热膨胀系数不同以及形成合金时体积的变化而处于应变状态。在适当的应变条件下, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的能带结构由间接带隙变为直接带隙。正如 Miglio 等人指出,带隙对结构很敏感,最近邻原子间距离稍微减小,就可使得  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 由间接带变为直接带。他们指出,当晶格长度  $b$  和  $c$  延伸了大约 0.24% 时,  $Y$  点的跃迁就会转变为直接跃迁,具有直接带结构,见图 2、图 3。然而,间接跃迁对发光也有贡献,A. G. Birdwell 等人于 2008 年通过分析光子调制光谱,发现  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的薄膜材料中的  $(0.823 \pm 0.002) \text{ eV}$  发光源自声子辅助的间接跃迁<sup>[6]</sup>。

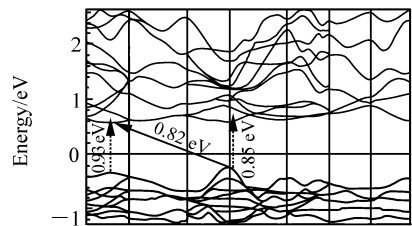
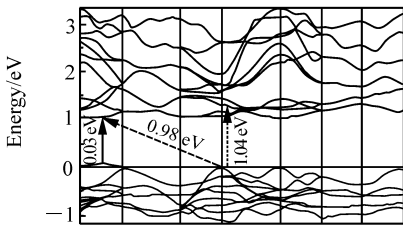


图 2 无应变条件下的间接带隙<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Indirect band gap without strain<sup>[7]</sup>

$\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 材料的发光并非完全来自  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的带间跃迁。这主要是因为目前的  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜是生长在单晶硅基底上的,制备过程中会引入缺陷。Si 基底缺陷发光有  $D1$  线  $0.81 \text{ eV}$ 、 $D2$  线  $0.87 \text{ eV}$

图3 应变条件下的直接带隙<sup>[7]</sup>Fig.3 Direct band gap with strain<sup>[7]</sup>

等<sup>[8]</sup>,这意味着缺陷发光将会展宽发光谱,并会使发光强度(PL)与温度呈现复杂关系。缺陷对 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的发光主要有两方面的影响:Si的空位产生非辐射中心,从而降低发光效率;光致发光时,由于光子能穿透约10  $\mu$ m的薄膜进入基底中,激发缺陷的辐射或非辐射复合,所释放的能量将通过弛豫等方式进一步激发 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub><sup>[9,10]</sup>。2007年,T. Suemasu发现了不同的制备手段得到的材料虽有相似的发光谱,但发光来源不同<sup>[11]</sup>。为了进一步了解材料的发光来源,通常需要对发光的衰减时间和PL与温度的关系进行分析。

### 3 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>薄膜制备与发光性能

Fe-Si系存在着多种化合物,如 $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>、 $\gamma$ -FeSi<sub>2</sub>和 $\epsilon$ -FeSi等,对于 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>而言,体材料和薄膜材料有着不同的相变过程<sup>[7]</sup>。由于只在薄膜材料中有发光性质,所以这里仅关注薄膜材料的制备。不同的制备方法所得到的Fe-Si化合物有着不同的相变过程, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>结晶的形态也会不同。可见,合适的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>制备过程是得到高效发光的关键。

目前,较为常见的制备方法主要有离子束合成(Ion-beam Synthesis, IBS)、分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、反应沉积外延(Reactive Deposition Epitaxy, RDE)、脉冲激光沉积(Pulse Laser Deposition, PLD)和电子束蒸发沉积法(Electron-beam Evaporator Deposition, EBED)等<sup>[12,13]</sup>。不同的制备方法会导致 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>不同的结晶过程和颗粒形态,进而对发光产生不同的影响。

IBS法容易得到 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>埋层,且可以通过改

变束流密度和加速电压来控制注入离子的分布,故此法广泛应用于 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的制备,并于1997年实现了LED结构发光<sup>[14]</sup>。通常,为了减少注入所引入的缺陷,Fe的注入剂量较小<sup>[2]</sup>,但注入剂量小必然会导致形成的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>颗粒少、密度小,从而发光较弱。2006年,Muneyuki等人将 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 的大剂量Fe离子注入到Si(111)晶片中,并对样品在200~700  $^{\circ}\text{C}$ 温度下进行退火,发现了Fe-Si化合物在IBS方法制备条件的具体相变过程<sup>[2,15]</sup>。

当样品未退火时,分为3层:底层—Si(111)基底,中间层—非晶硅(a-Si),表层—非晶态Fe-Si化合物。在200  $^{\circ}\text{C}$ 退火条件下,样品中无晶化现象。300  $^{\circ}\text{C}$ 退火2 h后,原来的非晶态Fe-Si层清晰地分成上下两层,与a-Si相邻的底层(B层)并无变化,上层(A层)形成 $\epsilon$ -FeSi。在500  $^{\circ}\text{C}$ 下退火2 h后,B层晶化完全,通过微光束电子衍射发现这一层已经转化为 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>,并且相邻的a-Si有晶化趋势。当退火温度继续升高后,B层的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>向表面A层和a-Si两个方向扩展,并在退火温度为700  $^{\circ}\text{C}$ 时结晶完全,全部生成 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>。在 $\epsilon$ -FeSi转化成 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>时,余出的Fe离子将向Si层中扩散,这种扩散不仅使 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>层扩展,而且会减少a-Si再结晶时产生的缺陷。A、B分层主要是源于Fe离子在薄膜中的浓度分布,45%的铁分布在A层中<sup>[2]</sup>,正是由于铁的含量高,易于满足 $\epsilon$ -FeSi的化学配比关系,故A层中先形成 $\epsilon$ -FeSi。研究人员还发现,Fe离子在表面的大量分布与TRIM程序的计算结果不同<sup>[2,15~18]</sup>,并对这一现象有不同解释,但Marabu Ishiman和Tan认为这是由表面溅镀所引起的<sup>[16]</sup>。有报道称,将Fe离子注入到Si(001)中,会在Si(001)与Fe-Si非晶化合物相邻处的n-Si(001)中形成周期性的 $\gamma$ -FeSi<sub>2</sub>结构<sup>[2,19]</sup>,并在700  $^{\circ}\text{C}$ 以上退火时消失。在900  $^{\circ}\text{C}$ 以上退火会向Si和 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>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,使得电致发光减弱<sup>[7]</sup>。

虽然IBS法制备工艺简单,但晶体相变过程复杂,且难以获得大面积、连续的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>薄膜。RDE和MBE方法则能实现这一要求,而且由于

是直接沉积,并无复杂的离子分布, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的形成过程也相对简单。对于RDE方法而言,生长温度是关键,在Si(001)基底上需要约470 °C<sup>[6,20]</sup>,而在Si(111)上则需要650 °C才能获得较为理想的晶体<sup>[19]</sup>。缺点是固相反应只发生在界面,难以获得单相的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>膜,也难以获得较厚的膜,固相外延法制备的膜厚只有几纳米,薄膜的形貌差。

MBE法的生长温度在50 ~ 800 °C之间。有报道称,500 °C条件下生长会得到比750 °C更强的发光强度,这与通常认为高生长温度结晶质量好的观点相冲突<sup>[20]</sup>。此法优点是相比于其它传统方法,薄膜的晶体质量有所提高,生长速度可达每秒纳米的量级;缺点是薄膜的质量还是不够好,需要高真空环境。

采用模板技术,即先用RDE方法生长一层 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>,并退火,再采用MBE法生长一层 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>,会有更强的XRD衍射峰。但在PL谱中,样品发光强度并无明显增强<sup>[19]</sup>,这表明薄膜中出现再结晶织构。通过对比样品的发光谱和发光寿命,T. Suemasu等人认为未采用模板技术的样品发光来源是 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的带间跃迁,而采用此技术的样品发光中含有带间跃迁与缺陷发光。可见,模板技术对发光性能改善并无帮助。

PLD法是80年代发展起来的制膜技术,优势在于生长速率快、沉积参数易调。应用PLD法制备的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>薄膜多是采用纳秒脉冲激光,制备的薄膜表面是不连续的,且存在大量纳米级颗粒。近来,飞秒激光开始应用于 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的制备中。由于飞秒激光的功率密度远高于材料剥离的阈值功率密度,飞秒激光与靶材的相互作用主要以多光子电离为主,所以激光斑的大小和能量密度变得不再敏感,沉积中的热扩散效应也比纳秒脉冲激光弱得多。近期,华中科技大学应用飞秒脉冲激光沉积的方法制备了 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>薄膜<sup>[22]</sup>,在500 °C热处理后,获得颗粒尺寸在30 ~ 150 nm的晶体,且得到室温下 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的带间跃迁发光。

当颗粒直径小于应变状态下 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>的玻尔半径(约6 nm)时,会产生更强的量子束缚效应,并减弱离散电子能级所导致的激子热猝灭<sup>[13]</sup>。有报道称,当 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>纳米颗粒尺寸由5 nm减小到2 nm时,能带宽度增大0.4 eV<sup>[3]</sup>。但IBS、

MBE、RDE及PLD等方法所制备的 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>颗粒均在10 nm以上,无法实现量子效应,而EBED法则可以满足这一要求,因此,该方法将广泛应用于 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>薄膜的制备中。

EBED法通过控制Fe/Si的配比关系、沉积量和沉积速率,可以改变 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>颗粒尺寸及密度。近期,Yoshiaki Nakamura等人已采用EBED法制得直径在10 nm以内,密度在10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>以上的颗粒,这为研究 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>在量子效应下的物理机制提供了手段。目前,深入研究的主要沉积过程有3种:(1)在硅基底上氧化出一层SiO<sub>2</sub>膜(约0.3 nm),在氧化膜上沉积Si形成Si的纳米级颗粒,然后再在其上沉积Fe,经过退火处理得到 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>颗粒<sup>[23]</sup>;(2)同前一种方法一样制得氧化

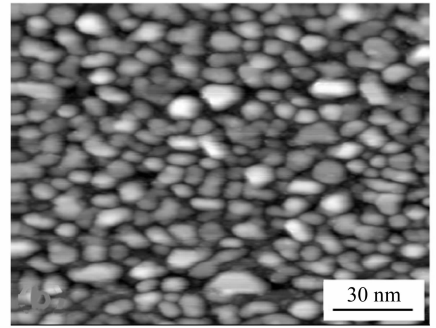


图4 550 °C退火后,预沉积样品的STM图像<sup>[13]</sup>  
Fig. 4 STM photo of synchronous deposition sample after annealing at 550 °C<sup>[13]</sup>

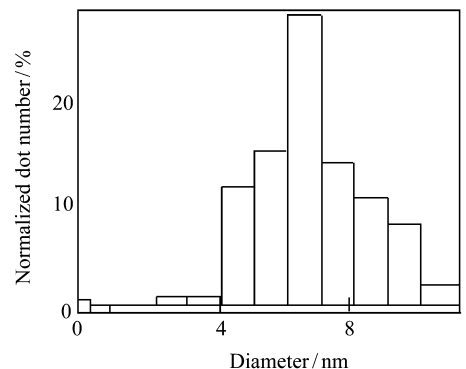


图5 预沉积样品中 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>颗粒的尺寸分布<sup>[13]</sup>  
Fig. 5 Distribution of grain size at Fe dose of 4 ml and Si dose of 8 ml<sup>[13]</sup>

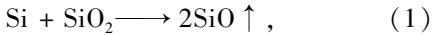
膜,在氧化膜上按 Fe/Si = 1/2 的比例同时沉积,经过热处理得到  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub><sup>[13]</sup>; (3) 在氧化膜上预先沉积 Si, 然后按比例沉积 Fe 和 Si, 再进行退火<sup>[13]</sup>。这 3 种制备过程中,仅有方法(3)能有效生成  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 单相、连续的纳米颗粒,见图 4、图 5。相变过程见表 1。

表 1 同时沉积样品的相变过程<sup>[13]</sup>

Table 1 Phase change process of synchronous deposition<sup>[13]</sup>

	400 °C	500 °C	600 °C
Si-predeposited	<i>c</i> -FeSi	$\beta$ -FeSi <sub>2</sub>	$\alpha$ -FeSi <sub>2</sub>
Non-predeposited	<i>c</i> -FeSi	<i>c</i> -FeSi $\varepsilon$ -FeSi	$\alpha$ -FeSi <sub>2</sub> $\varepsilon$ -FeSi

其反应式为:



氧化层在此方法中有着重要作用:(1) 由于反应式(1)的存在,使得反应后留下的空位起到结晶点的作用,为高密度( $> 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ )颗粒的形成提供了条件,而预沉积的 Si 正是为了补偿反应中所消耗的 Si;(2) SiO<sub>2</sub> 层的存在会阻止 Fe 进入 Si 基底,维持了 Fe/Si 的比例<sup>[13]</sup>。相对于其它以 Si 基底作为  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 中 Si 来源的制备方法,此法使  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 层与基底拥有清晰的界面。EBED 方法不仅可以有效避免缺陷产生,而且保留了使  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 转变为直接带隙的应变条件。

## 4 发光性能改善

为了获得更强的发光,人们尝试了许多方法,主要集中在两方面:

(1) 良好的结晶质量,尽可能少的缺陷是  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 高效发光的基础,为此人们做了以下努力:探索新的制备方法,并改善已有工艺,使得  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 颗粒形态规则、密度大,不仅保留应变条件,而且能够减少缺陷,在这方面 EBED 方法具有优势;尝试在  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜中应用其它元素。目前已发现 IBS 法制备的样品中,以较 Fe 注入量小两个数量级的量注入 Al 离子会明显增强发光<sup>[24]</sup>,其

原因是铝的掺杂减少了非辐射中心的数量。Cu 膜被镀在  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 层与 Si 的界面上也可以提高结晶质量,但掺杂 Cu 并无此效果<sup>[25]</sup>。

(2) 能够有效激发  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的 p-i-n 结构也是研究的重点。目前,通常是将掺杂其它元素的 Si 层作为 p-n 结,而掺杂会对 Si 带来缺陷影响发光<sup>[26]</sup>。因此,仍需进一步研究合适的掺杂元素和掺杂方法。另一方面,通过设计 p-i-n 结构,应用较为成熟的微电子工艺也是增强发光的有效方法。 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 与电极材料之间界面行为的研究鲜有报道,对此尚无清晰认识。

## 5 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的应用前景

半导体材料  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 由于其特有的优势在以下领域有着潜在应用:

(1)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 能在硅表面外延生长,与硅器件工艺相匹配,可利用成熟的硅器件工艺发展硅基近红外光源、探测器等光电器件。 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 对于红外波长有高吸收率,理论的光电转换效率可达 16% ~ 23%,尤其是  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 所对应的 0.8 eV 波段正是硅的全透明区,也是光纤通信中的最重要波段。

(2)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜只需 1  $\mu\text{m}$  就可吸收几乎全部的太阳光,远小于硅晶体所需的 100  $\mu\text{m}$ 。在制造工艺上, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 和多晶硅薄膜电池一样可集电池和组件于一体,从而大大降低了生产成本,这为  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 应用于太阳能电池领域提供了广阔前景。

(3)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 的化学稳定温度高达 937 °C,有较强的防辐射、防潮、抗氧化和抗化学腐蚀性。 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 有着较高的热电转换效率,在高温下(500 ~ 900 °C)具有良好的热电性能,是一种能实现热电转换的功能材料,通过不同元素的掺杂可以制得 p 型或 n 型半导体。目前,对于  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 在热电领域的研究正逐渐深入。

综合考虑这些因素,随着  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜制备难题的解决, $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 有望用于光通讯、大规模集成电路及红外探测系统,成为颇具发展潜力的光电子新材料,还可用于制作薄膜光电器件、红外二极管、高效的薄膜太阳能和热电器件。

## 参考文献:

- [1] 金友. 美国投资 600 万美元预计 5 年完成硅基激光器研制工作[J]. 光机电信息, 2007, (4): 29-29.  
JIN Y. USA invests six million USD for investigation of silicon based laser in 5 years[J]. *OME Information*, 2007, (4): 29-29. (in Chinese)
- [2] ISHIMARU M, OMAE K, BAE I T, *et al.*. Formation process of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si heterostructure in high-dose Fe ion implanted Si[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 99: 113527.
- [3] NAKAMURA T, SUZUKI R, UMENO M, *et al.*. Observation of the quantum-confinement effect individual  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> nanoisland epitaxially grown on Si(111) surfaces using scanning tunneling spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89: 123104.
- [4] 李成, 赖虹凯, 陈松岩. 退火温度对嵌入 Si 中的  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 颗粒发光的影响[J]. 半导体学报, 2006, 27(1): 82-84.  
LI CH, LAI H K, CHEN S Y. Influence of annealing temperature on luminescence of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> particles embedded in silicon[J]. *J. Semiconductors*, 2006, 27(1): 82-84. (in Chinese)
- [5] SUEMASU T, NEGISHI Y, TAKAKURA K, *et al.*. Influence of Si growth temperature for embedding  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> and resultant strain in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> on light emission from p-Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> particles/n-Si light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79: 1804-1806.
- [6] BIRDWELL A G, LITTLER C L, GLOSSER R, *et al.*. Evidence for an indirect gap in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epilayers by photoreflectance spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92: 211901.
- [7] 马秋花, 路朋献.  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 基热电材料的研究进展[J]. 稀有金属快报, 2006, (7): 1-5.  
MA Q H, LU P X. Progress of studies on the  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> based thermoelectric materials[J]. *Rare Metals Lett.*, 2006, (7): 1-5. (in Chinese)
- [8] OZAWA Y, OHTSUKA T, LI C H, *et al.*. Influence of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> particle size and Si growth rate on 1.5  $\mu$ m photoluminescence from Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>-particles/Si structures grown by molecular-beam epitaxy[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(10): 5483-5486.
- [9] MARTINELLI L, GRILLI E, GUZZI M, *et al.*. Room-temperature electroluminescence of ion-beam-synthesized  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> precipitates in silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(4): 794-796.
- [10] HIROYASU T, SHIN-ICHIRO U. Optical properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> on Si(100) inclined substrate[J]. *Silicon Photonics III*, 2008, 6898-6904.
- [11] SUEMASU T, UGAJIN Y, MURASE S, *et al.*. Photoluminescence decay time and electroluminescence of p-Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> particles/n-Si and p-Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> film/n-Si double-heterostructures light-emitting diodes grown by molecular-beam epitaxy[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, 101: 124506.
- [12] 陈荔群, 李成, 赖虹凯.  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 材料的生长、性质及其在光电子器件中的应用[J]. 中国材料科技与设备, 2006, 3(4): 16-19.  
CHEN L Q, LI CH, LAI H K. Growth and properties of semiconductor  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> and its application in optoelectronic devices[J]. *Chinese Mater. Sci. Technol. Eq.*, 2006, 3(4): 16-19. (in Chinese)
- [13] YOSHIKI N, YASUSHI N, SUNG P CH, *et al.*. Formation of ultrahigh density and ultrasmall coherent  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> nanodots on Si(111) substrates using Si and Fe codeposition method[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100: 044313.
- [14] LEONG D, HARRY M, REESON K J, *et al.*. On the origin of the 1.5  $\mu$ m luminescence in ion beam synthesized  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>[J]. *Nature(London)*, 1997, 387: 686-691.
- [15] MUNIYUKI N, MANABU I, YOSHIHIKO H, *et al.*. Solid phase crystallization of amorphous Fe-Si layers synthesized by ion implantation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 251904.
- [16] TAN Z, NAMAVAR F, BUDNICK J I, *et al.*. Silicide formation and structural evolution in Fe-, Co-, and Ni-implanted silicon[J]. *Phys. Rev. B.*, 1992, 46: 4077-4085.
- [17] LI X N, NIE D, DONG CH. A comparative study on microstructures of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> and carbon-doped  $\beta$ -Fe(Si, C)<sub>2</sub> films by transmission electron microscopy[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.*, 2002, 194: 47-53.
- [18] GUMAROV G G, PETUKHOV V T, SHUSTOV V, *et al.*. Effect of ion current density on the phase composition of ion beam synthesized iron silicides in Si(100)[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.*, 1997, 127-128: 321-323.

- [19] SPINELLA C, COFFA S, BONGIORNO C, *et al.*. Origin and perspectives of the 1.54  $\mu\text{m}$  luminescence from ion-beam-synthesized  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> precipitates in Si[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76:173-175.
- [20] SUEMASU T, NEGISHI Y, TAKAKURA K, *et al.*. Influence of Si growth temperature for embedding  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> and resultant strain in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> on light emission from p-Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> particles/n-Si light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 79:1804-1807.
- [21] TAKAUJI M, SEKI N, SUEMASU T, *et al.*. Growth of Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si double-heterostructures on Si(111) substrates by molecular-beam epitaxy and photoluminescence using time-resolved measurements[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 96:2561-2565.
- [22] 周幼华, 陆培祥, 杨光, 等. 飞秒激光沉积 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si 半导体膜及光学性能研究[J]. *无机材料学报*, 2007, 22(3): 545-549.  
ZHOU Y H, LU P X, YANG G, *et al.*.  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin film prepared by femtosecond laser ablation and its optical characteristic[J]. *J. Inorg. Materials*, 2007, 22(3):545-549. (in Chinese)
- [23] YOSHIKI N, YASUSHI N, SUNG P CH, *et al.*. Formation of strained iron silicide nanodots by Fe deposition on Si nanodots on oxidized Si(111) surfaces[J]. *Phys. Rev. B.*, 2005, 72:075404.
- [24] YOSHIKAZ T, YOSHIHITO M. Enhancement of 1.54  $\mu\text{m}$  photoluminescence observed in Al-doped  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84:903-905.
- [25] KENSUKE A, SATORU K, HIROSHI F, *et al.*. 1.54  $\mu\text{m}$  photoluminescence from  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> as-deposited film[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91:071903.
- [26] LI CH, OHTSUKA T, OZAWA Y, *et al.*. Influence of boron-doped Si cap layer on the photoluminescence of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> particles embedded in Si matrix[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94:1518-1520.

作者简介:朱 放(1984—),男,黑龙江鸡西人,硕士,主要从事光电材料的研究。E-mail:hot698@126.com

肖志松(1973—),男,江西南昌人,博士,副教授,主要从事纳米光电子学的研究。E-mail:zsxiao@buaa.edu.cn