

# Si 基光子材料的研究进展\*

蒋学华

(临沂师范学院 物理系,山东 临沂 276005)

**摘 要:**评述了研究开发 Si 基光子材料的意义,简述了超晶格、能带工程和 Si 基异质结构的物理机制,介绍了 Si 基光子材料研究的进展。

**关键词:** Si 基光子材料;超晶格;能带工程;Si 基异质结构

**中图分类号:** O471 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-532X(2002)04-0062-04

Si 微电子技术的发展是 20 世纪最引人注目的高技术成就之一,已经引起社会乃至人们日常生活的巨大变革<sup>[1]</sup>。集成电路的发明者和异质结构工作原理的奠基人共同获得 2000 年诺贝尔物理学奖充分地说明了这个问题。现在,当 Si 微电子技术越来越接近其量子极限的时候,信息和通讯对进一步提高传输速率,开发研制超高速、超大容量的光电子集成芯片提出挑战。于是 Si 基信息光子材料的研究开发便成为世界范围特别受关注的重大研究课题,国家自然科学基金委九五期间为此设立以王启明院士为首的“半导体光子集成基础研究”重大项目,这一项目也是国家“863”计划的资助课题。

Si 基光子材料是世界范围内半导体领域中出现的人工设计的材料,它从能带工程出发,通过设计裁剪材料的光电性质,以适应各种新型微电子、光电子器件的需要和发展<sup>[2]</sup>。它具有许多独特的物理性质和极其重要的应用,并且能与 Si 的微电子工艺技术兼容,因而受到人们高度重视。Si 基光电子材料是 20 世纪 90 年代新型光电子、微电子材料,被誉为“第二代硅”。它的出现使 Si 材料进入到人工设计的微结构,使硅器件进入到“异质结构”、“能带工程”的全新时代。Si 是间接带隙材料, Si 的发光效率很低,不适于作发光器件。然而,能带工程给 Si 基材料带来了希望,通过量子结构,利用能带折叠效应,理论上已经预言能将间接带转变为直接带或准直接带,实验上也制造出

各种量子结果,包括量子阱、量子线和量子点等,大大提高了载流子的注入、限制和辐射复合效率,给发光器件的研究带来了一线希望<sup>[1~4]</sup>。因此,尽管 Si 基发光研究仍十分困难,但许多发达国家,国际上一些著名的研究机构都在大力开展这一研究。我国科学院半导体研究所等科研单位,厦门大学、台湾清华大学等高校也在从事 Si 基光子材料的理论和应用研究。

## 1 超晶格与能带工程

超晶格材料是由 2 种或 2 种以上性质不同的薄膜相互交替生长而成的多层结构晶体。一般来说,它的周期长度比单层薄膜单晶的晶格常数大几倍或更长,因而取名“超晶格”。超晶格分为组分超晶体和掺杂超晶格。如果 2 种不同的半导体薄膜相互交替生长而形成超晶格时,一般来说,它们的电子亲和势垒和禁带宽度都不同,这种由不同材料的薄膜所构成的超晶格材料称为组分超晶格。同一种半导体材料中,用交替改变掺杂类型的方法构成的半导体超晶格材料是另一种新型人造周期性半导体结构,称之为掺杂超晶格。

为了获得准直接带隙的高效 Si 基光子材料,近 30 年来,中外科学家作了多方面的努力,提出并研制了多种不同结构的超晶格量子阱材料。如 Ge/Si 超晶格, SiGe/Si 超晶格, SiO<sub>2</sub>/Si 超晶格,非晶硅/纳米硅超晶格和氧化硅/纳米硅超晶格等<sup>[2]</sup>。

\* 收稿日期: 2002-08-27

作者简介: 蒋学华(1965-),男,山东莒县人,临沂师范学院副教授,硕士,主要从事理论物理的教学与研究。

人们对超晶格感兴趣是由于期望从这结构中产生新的材料特性,超晶格结构不仅影响固体中电子的运动,而且也影响光子与固体之间的相互作用。利用这些效应,我们就能“设计”材料,并提供具有奇异特性的新型器件的可能性。而半导体中电子的分布和运动是由其能带结构决定的,高速材料的组分或改变组成它的元素均可引起能带结构的变化,使其适应设计需要,实现某种功能,这就是所谓“能带工程”。

半导体器件功能都与材料的能带结构有关。在通常条件下,体材料的能带结构是天然的、固有的,故体材料的应用受到许多限制,而半导体超晶格和量子结构的能带结构可以按照人们的不同需要进行设计和裁剪,因而大大地拓宽了材料的应用范围,如 Si 和 Ge 都是间接带隙材料,发光效率很低。但是,可以通过人工设计制成准直接带隙或直接带隙材料,提高发光效率,使之能够应用于发光领域。在电子器件制备过程中超晶格的设计和实现也属于“能带工程”的研究领域。

## 2 Si 基异质结构

Si 基异质结构主要有 4 大类<sup>[3]</sup>:

(1) IV 族元素半导体及其合金/Si 异质结构<sup>[4~7]</sup>:如  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ,  $\text{Ge}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}$ ,  $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}$ ,  $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y/\text{Si}$ ,  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Si}$ ,  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Si}$  等,在含 C 的  $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y/\text{Si}$  异质结构中,通过改变 C 含量可以改变应变层同 Si 衬底间的晶格匹配,并能获得禁带宽度的调制,因而备受人们的重视。

(2) III - V 族化合物及其合金/Si 异质结构<sup>[8]</sup>:在光电子学领域中,III - V 族化合物是非常成功的半导体材料,这类的异质结构如  $\text{GaAs}/\text{Si}$ ,  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{Si}$ ,  $\text{As}/\text{Si}$ ,  $\text{GaP}/\text{Si}$ ,  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/\text{Si}$  等,但存在晶格失配、在 Si 上外延生长还存在极性问题等。

(3) II - VI 族化合物及其合金/Si 异质结构<sup>[8]</sup>:II - VI 族化合物也是一组重要的光电材料,特别在红外波段中,它们有着极其重要的作用。已报道的这类异质结构有  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}/\text{CdF}/\text{Si}$ ,  $(\text{Zr} - \text{Ce})/\text{Si}$  等,但这些研究还处于初步阶段。

(4) Si 基上生长硅化物(如  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NiSi}_2$ ,  $\text{FeSi}_2$  等)和  $\text{WO}_3$  等异质结构<sup>[9]</sup>:如  $\beta$  相二硅化铁( $\beta$ - $\text{FeSi}_2$ )是由在(100)硅上进行离子注入,然后退火而产生的,可得到近乎直接带隙材料,这种材料在光激发下能发射  $1.5 \mu\text{m}$  的光,作为制造发光器件的材料,基本上满足制造实用半导体电致发光器

件的要求。尤其是采用离子注入制备  $\beta$ - $\text{FeSi}_2$  的工艺完全与广泛使用的硅技术兼容。因此  $\beta$ - $\text{FeSi}_2$  是制造实用的硅基集成电路的重要材料之一。

对 Si 基异质结构的应用研究主要集中在异质结构的外延生长方面,目前掌握的生长方法有 10 多种<sup>[3]</sup>。对于 Si 基异质超晶格结构来说,多采用分子束外延法(MBE)和化学气相淀积法(CVD),尤其是气体源分子束外延法(GS-MBE)和超真空化学气相淀积法(UHV/CVD)。UHV/CVD 技术具有很多优越性,其本底真空可高达  $5 \times 10^{-8}$  Pa 以上,有效地抑制了本底杂质的影响,源为气体,其离解、激活、化合、生长等过程类似常规的化学气相淀积,便于控制,生长温度较低,与器件的其它工艺相容性好,生长速度可低至  $0.1 \sim 1 \text{ nm}/\text{min}$ ,有利于单原子层外延生长,可采用激光诱导 CVD 生长,即使在  $200^\circ\text{C}$  的低温也能进行选区外延生长。因此, UHV/CVD 技术具有很好的应用前景。

## 3 Si 基光子材料研究进展

Si 基材料的器件主要有 SiGeHBT、鹰形 SiGe 沟道 MOSFET、调制掺杂 MOSFET、异质结构 CMOS、量子效应器件、Si 基异质结探测器和 Si 基光波导器件等,世界范围内对 Si 基光子材料的研究已取得了迅速的进展,如 SiGe 异质结,1995 年美国的 IBM 公司研制的 SiGe - HBT 的截止频率达  $140 \text{ GHz}$ 。德国 Daimler - Benz 研制中报道 SiGe - HBT 的最高频率达  $160 \text{ GHz}$ <sup>[10]</sup>。将场效应晶体管(FET)双极晶体管(HBT)探测器和光波导集成在同一 Si 衬底上的单片光集成,以及将激光器与 Si 基其它器件通过键合方式构成的混合光电集成都已问世<sup>[11]</sup>。以中国科学院半导体研究所为首的国内许多研究机构 and 高校参与了对 Si 基光子材料的理论和应用研究,取得了很多有价值的研究成果<sup>[12~14]</sup>,在世界上处于先进水平。

关于 Si 基光子材料和器件的研究不断出现令人鼓舞的突破性进展,意大利 Trento 大学 Pavese L 教授的研究组在 Nature 2000 年 409 卷上发表的重要论文,报道了在 Si 纳米晶上发现光增益<sup>[15]</sup>。他们同时用 2 种方法制作低维 Si 纳米晶:在超纯石英衬底上用负离子注入工艺;在经热生长  $\text{SiO}_2$  层的 Si 衬底上用负离子注入 Si,然后进行高温热退火。前者用于光透射实验研究,后者用于验证与微电子学的兼容性,透射电子显微镜测量证明,

Si 纳米晶的直径约 3 nm ,它们被嵌入离表面 110 nm 处 ,厚度约为 100 nm。

Pavesi 等人对以上样品进行了发光和光增益的测量和分析 ,并提出一个在 Si 纳米晶中实现粒子数反转的三能级图。吸收泵浦光(波长 390 nm)使电子从价带顶跃迁到导带底 ,然后快速(纳秒量级)弛豫到导带下方的界面态。界面态上的电子有很长的寿命 ,并可实现粒子数反转。由界面态到价带顶的复合可出现受激发射 ,描述光放大的一个重要参数是光增益截面 ,Pavesi 测得每个 Si 纳米晶的光增益截面为  $0.5 \sim 5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  ,仍然比 InAs 量子点的小 3 个量级。但由于采用离子注入方法 ,Si 纳米晶的面密度比单层 InAs 量子点也高出 3 个量级 ,使得二者的净材料增益大致处于同一量级。总之 ,Si 纳米晶在短波激光泵浦下有光增益已经获得实验证实 ,是一项突破性新发现。但 Pavesi 得到的并不是相干光输出 ,离真正实现 Si 激光器还有一段距离。实际上 ,覆盖 SiO<sub>2</sub> 的 Si 纳米晶的电子结构依然保留了体材料 Si 间接带隙的某些特征 ,还不能像已有的直接带隙材料 ,如 GaAs 那样实现电注入式的激光输出。此外 ,Si 纳米晶的发光依赖于界面态 ,是较慢的毫秒量级的发光 ,比 GaAs 的纳秒量级发光慢得多。说明其发光过程存在着发热与光子发射之间的竞争。

另一项具有同样重要意义的工作来自美国北 Calolina 大学的报道 ,华裔学者 Zhang Qi 及其合作者采用结晶 Si/O 超晶格制作 c - Si/O 结构的 LED ,发现它具有超稳定的可见光(峰值位置 2 eV)电致发光输出<sup>[16]</sup>。他们公布的数据表明 ,器件工作 7 个月发光强度依然稳定 ,没有迹象表明

参考文献 :

[ 1 ] 王启明.信息高科技领域中的半导体光电子学[J].半导体学报 ,1998 ,19( 10 ):721.

[ 2 ] 陈维德.硅基发光材料和器件研究[J].物理 ,1999 28( 12 ):741.

[ 3 ] 余金中.Si 基光电子学研究进展[J].半导体杂志 ,1998 23( 1 )21.

[ 4 ] 夏建白.硅发光研究[J].半导体学报 ,1998 ,19( 5 )321.

[ 5 ] Dietrich B , Osten H J , Rucker H , et al. Lattice distortion in a strain - compensated Si1 - x - yGexCy layer on silicon[J]. Phys Rev ,1994 , B49 :17185.

[ 6 ] Wu L Q , Huang M C , Li S P , et al. Theoretical study of valence - band offsets of strained Si1 - x - yGexCy/Si( 001 ) heterostructures[J]. Appl Phys ,1999 , 8( 8 ):4473.

[ 7 ] 黄美纯 ,吴丽清 ,朱梓忠.碳对应变层异质结 SiSi1 - x - yGexCy/Si( 001 )价带带阶的影响[J].发光学报 ,1999 ,20( 4 ):34.

[ 8 ] 夏建白 ,黄昆.我国半导体物理研究进展[J].物理 ,1999 28( 5 )525.

[ 9 ] 林峰 ,盛篪 ,龚大卫 ,等.硅/二氧化硅超晶格[J].物理 ,1998 27( 8 )467.

[ 10 ] Widenkehr M. III - V s & SiGe to be featured at IEDM[J]. Compound Semiconductor ,1995 ,( 11 - 12 ):18.

有下降的趋势。这个特性显然比多孔硅好得多 ,Zhang 的器件是在 0.01 ~ 0.03  $\Omega\text{cm}$  的 n - Si( 100 ) 衬底上 ,采用分子束外延( MBE )得到的 ,外延 Si 时真空度为  $10^{-10}$  Torr ,生长 O 单层时采用把压力降为  $10^{-7}$  Torr ,等于在微量氧气氛中曝露短暂时间 ,重复这个过程生长出 9 层 Si/O 超晶格。其中 Si 层的厚度 1 ~ 2 nm ,O 是一个单层 ,虽然这种制作工艺需要精确、严格地控制 Si/O 原子层的生长 ,但它是可以与 Si 微电子工艺兼容的 ,对于开发全 Si 基光电子——微电子集成芯片有重大现实意义。

4 结语

利用应变超晶格结构 ,一些原本同 Si 衬底晶格不匹配的材料 ,诸如 Ge , SiGe , SiGeC 等 IV 族材料、GaAs 等 III - V 族化合物、PbSnSe 等 II - VI 族化合物等 ,都成功地外延生长在 Si 衬底上。能带工程为 Si 基光子材料带来了新特性、新功能、新应用。通过控制超晶格的组分和周期 ,利用能带折叠效应 ,使得 SiGe 等间接带隙材料成为准直接带隙或直接带隙材料。从而使 Si 基光子材料在光电领域和微电子领域中大展宏图。多孔硅技术的发展 ,在硅 pn 结中增加  $\beta - \text{FeSi}_2$  埋层或掺 Er ,为迅速发展的光纤通信的需要、甚大规模集成电路的高互连密度带来的技术上的困难和带宽限制的解决 ,提供了十分有效的实用途径和应有前景。Si 微电子学技术同其它材料的电子学、光电子学技术的巧妙结合 ,将材料的特性、器件的功能和应用的范围大大拓宽 ,为新一代的超大规模集成电路和智能化的光电子集成创造美好前景。

- [ 11 ] Kimerling K D , Kolenbrander , Michel J , et al. Light - emission from Silicon[ J ]. Solid State Physics ,1997 , 50 :333 - 381.
- [ 12 ] 司俊杰 杨沁清 高俊华 ,等 . 图形衬底上应变 SiGe/Si 超晶格的结构及光致发光研究 [ J ]. 半导体学报 , 1999 , 20( 5 ) : 353.
- [ 13 ] 魏红振 余金中 刘忠立 . 硅基光波导及光波导开关的研究进展 [ J ]. 半导体光电 , 1999 , 20( 6 ) 369.
- [ 14 ] 韩伟光 余金中 王启明 . 硅基键激光器的研究进展 [ J ]. 半导体光电 , 2000 , 21( 2 ) :77.
- [ 15 ] Pavese L , Dal Negro L , Mazzoleni C. Optical gain in silicon nanocrystal[ J ]. Nature , 2000 , 409 :440.
- [ 16 ] Zhang Q , Filios A , Lofgren C , et al. Ultra - stable visible electroluminescence from crystalline - Si/O superlattice[ J ]. Physics , 2000 , E8 : 365.

## The Studying Development of Si - Based Photon Material

JIANG Xue-hua

( Department of Physics , Linyi Teachers ' College , Shandong Linyi 276005 ,China )

**Abstract** :The meaning of studying and developing Si - based photon material is expressed. The physical mechanism of superlattices , Energy - band project and Si - based heterostructure is expressed. The new studying development of Si - Based photon material is introduced.

**Keywords** Si - based photon material ; superlattices ; energy - band project ; Si - based heterostructure

( 上接第 29 页 )

## Construction Quality Control of Prestressed Technology for Round Concrete Pond Wall without Coherence

YANG Xi-jun<sup>1</sup> , SONG Wei-ming<sup>2</sup>

( 1. Yancheng City Center of Project Supervision , Jiangsu Yancheng 224001 ,China 2. Dafeng city Planning and Reconstruction Department , Jiangsu Dafeng 224100 ,China )

**Abstract** :This paper briefly introduces the construction prestressed technology for round concrete pond wall and its problems , then puts forward the countermeasures. This is a beneficial reference for no coherence prestressed construction quality control and supervision.

**Keywords** ;prestress without coherence ; common problems ; technical measures ; quality control

( 上接第 35 页 )

## Research & Development of Expert Diagnostic System in Cotton Spinning Mills

LV Li-bin<sup>1</sup> , TAO Guo-cheng<sup>2</sup>

( 1. Department of Textile Engineering of Yancheng Institute of Technology , Jiangsu Yancheng 224003 ,China ; 2. Bengbu Institute of Tank , Anhui Bengbu 233013 ,China )

**Abstract** :This paper introduces the assistant of the computer in cotton spinning mills , the experiment data are processed and analyzed by comparison with the criteria according to the data of the major quality factors of semi - products and finished product provided by every procedure in spinning production. Then the computer makes the diagnosis and judges whether the spinning production is normal or not. Furthermore it gives the possible causes of the state and its common solutions. Meanwhile , it provides means of aspects of special subject in spinning production and means of comprehensive criteria of yarn forming quality.

**Keywords** cotton spinning ; expert system ; control chart ; spectrum chart ; the membership degree