

基于发光机理提高掺铈硅基材料发光效率的几条途径*

李延辉¹ 刘技文^{2, †} 赵燕平² 李昌龄¹ 李娟¹

(1 天津理工大学材料物理研究所 天津 300191)

(2 天津理工大学材料科学与工程学院 天津 300191)

摘要 掺铈硅基发光材料可以用于制备光通信光源、光纤放大器,更重要的是可能成为实现硅基光电子集成技术的重要途径,已成为研究的热点之一.文章讨论了掺铈硅及掺铈硅基材料的发光机理,指出了制约实用化方面存在的问题.从不同方面着重探讨了共掺氧对提高掺铈硅发光效率的作用.最后介绍了基于掺铈硅发光机理提高掺铈硅基材料发光效率的几种途径、目前存在的主要问题及研究进展.

关键词 掺铈硅基材料,发光,机理,效率

Several routes towards high luminescence efficiency of Er-doped Si-based materials based on the luminescence mechanism

Li Yan-Hui¹ Liu Ji-Wen^{2, †} Zhao Yan-Ping² Li Chang-Ling¹ Li Juan¹

(1 Institute of Material Physics, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

(2 School of Materials Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract Er-doped Si-based light emitting materials have important potential applications in light sources for optical communication and fiber amplifiers. Erbium doping has recently emerged as a promising route towards Si-based optoelectronic integration. In this paper the luminescence mechanism of Er-doped silicon and several factors hampering its industrial applications, as well as the role of O when co-doped with Er, are discussed. Several methods to increase the luminescence efficiency, various problems and new developments are reviewed.

Key words Er-doped Si materials, luminescence, mechanism, efficiency

1 引言

稀土离子在晶体中的发光现象早已发现.从20世纪50年代以后,由于稀土元素的纯制技术和光谱测试技术的提高,有关固体中稀土离子性质的研究才开始发展起来.那时的主要工作集中在氧化物、氟化物等离子型化合物.20世纪60年代,激光器的出现使固体中稀土离子的发光倍受关注,并尝试进行半导体材料中掺杂稀土离子的研究^[1].由于稀土离子在半导体材料中的固溶度很低,当时掺杂工艺不成熟,难以用热平衡方法实现高浓度掺杂,同时对选择什么稀土离子进行掺杂具有一定的盲目性.基于

以上种种原因,半导体材料中掺杂稀土离子的研究在近二十年中进展不大.

直到20世纪80年代,铈成功掺入SiO₂中带来当代光纤通信的重大突破,并开拓了光纤放大器和光纤激光器的研究领域,这又激起了人们对半导体掺杂稀土离子的研究兴趣.随着通信领域的进一步扩展,迫切需要一种低成本并能够与大规模电路集成在一起的光电功能器件,于是光电子集成技术成为一种人们倍加关注的技术.光电子集成技术可以

* 国家自然科学基金(批准号:10074049)和天津市自然科学基金(批准号:023801611)资助项目

2004-10-19收到初稿 2004-11-04修回

† 通讯联系人. Email: jwliu@mail11.tjut.edu.cn

提高计算机的单机运算速度,据估计可提高3个数量级^[2],还可解决集成电路中大量引线间分布参数所造成的时间延迟、信号串扰等问题,使可靠性大大增加。因此,利用现有微电子技术,将光电子集成与成熟的硅工艺相结合的硅基光电子集成技术就成了人们梦寐以求的目标。在硅基光电子集成中,必须集成光源、光波导、光调制和光接收器件为一体。对于后三者,已经得到较成功的解决,但用硅来作光源则是一个尚需解决的问题。硅是一种间接禁带半导体,要使硅通过带间复合发光必须有声子的参与,这使得带间复合发光效率很低,于是人们开始广泛探索硅基高效发光材料。

1983年,Ennen等首次实现了掺铒硅波长在1.54μm处的发光^[3],研究人员马上意识到这是一种实现高效硅基发光的有效途径。由于其发光峰在1.54μm附近正好对应于通信光纤的最小吸收波长^[4-6],这使其在光通信领域中的地位更显突出。另外,铒的发光寿命较长,粒子数反转容易实现,有望实现掺铒硅基光纤放大器和激光器件^[7]。因此,世界各国对掺铒硅基发光材料开展了广泛、系统而深入的研究^[4-48]。

2 掺铒硅的发光机理

2.1 掺铒硅中铒中心发光的基本前提

掺铒硅1.54μm的发光来自于该体系中Er³⁺具有11个电子构型的4f壳层内的电子-电子跃迁发光。对于自由的Er³⁺来说,f→f的跃迁是电偶极子跃迁的宇称选择定则所禁戒的(尽管其磁偶极子或四极子跃迁是宇称选择定则所允许的,而使这类跃迁都有可能发生,但都很弱和电偶极子相比要小几个数量级),因此自由的Er³⁺由f→f的跃迁引起的1.54μm发光峰在光谱上不存在。Er³⁺只有处在一个较强的非中心对称性的局域晶场中,降低其能级的简并度,使相反宇称的不同组态(如5d)混入4f组态中,电偶极禁戒才可部分解除,使f→f的跃迁引起的1.54μm发光得以实现^[49,50]。尽管处于非中心对称晶场中的Er³⁺允许4f壳层内的电子跃迁,但电偶极禁戒只是部分被打破,跃迁几率仍然较低,这在一定程度上限制了Er³⁺的发光效率^[8]。

由上可知,铒只在3价时具有光学活性。但考虑基质情况,铒有时在不取传统离子晶体的3价时仍具有光学活性。万钧等认为,如果铒所在的半导体基质是以共价键结合的,则铒与基质之间的作用不是

完全离子性的,由于共价效应的影响,使得铒可以在不取传统离子晶体的3价时得到4f具有11个电子的构型,即4f上的有效电子不再是按照纯离子模型得到整数11(Er³⁺)或12(Er²⁺)^[9],这种现象被称为混价。上述的结论与许多理论计算所得到的结果^[10-12]是一致的。

尽管硅中具有光学活性的铒不一定是3价的,但掺铒硅的高分辨率光致发光谱仍表现出明显的Er³⁺在1.54μm处的发光特征,如发光峰的线宽很窄,其位置也基本不受基质晶格的影响,且不依赖于激发的强度和所处的环境温度^[3,4]。研究表明,Er³⁺的4f电子受5s5p电子的屏蔽作用,基质晶场对其能级的影响只在几百个波数范围,仅产生较弱的微扰。不管怎样,就铒在1.54μm处发光来说,3价最为有利,因为硅对铒的共价作用会在一定程度上降低其光学活性进而影响其发光效率。

2.2 Er³⁺能级在硅晶场中的分裂

由于基质晶场对Er³⁺仅产生较弱的微扰,因此在处理硅内铒中心发光时仍可近似采用传统的晶场+稀土离子模型来处理,实际上,这种简化处理是有效的^[12]。

Er³⁺的4f壳层内的电子数为11个,电子的基态应为L=6和S=3/2,外层5s和5p壳层已填满。由于外层屏蔽作用使4f电子自旋和轨道的相互作用远大于晶场的微扰,所以J仍可视为好量子数,即可以直接分析晶场对各个J值能级的劈裂情况。首先考虑自旋和轨道的相互作用,它使基态分裂成4个态,即J=15/2,13/2,11/2,9/2。由于4f壳层电子数大于半满,则由洪特定则可知,J越大对应的能级越低,故I_{15/2}是自旋-轨道耦合后的基态,I_{13/2}为第一激发态,它们的简并度分别为16重和14重。当在弱四面体晶场T_d(铒在硅中所处的一种具有典型对称性的晶场)作用下,进一步被劈裂成一系列Stark能级(Γ₆,Γ₇,Γ₈)。基态I_{15/2}分裂成2个双重态Γ₆,Γ₇和3个四重态Γ₈,第一激发态⁴I_{13/2}分裂成1个Γ₆,2个Γ₇和2个Γ₈。当晶体场不具有立方对称性时,基态I_{15/2}和第一激发态I_{13/2}的Γ₈分裂成2个Kramers双重态^[13]。分裂后能级的位置、次序依赖于晶场的强度。Er³⁺能级在硅晶场中的分裂如图1所示。

2.3 掺铒硅中Er³⁺在1.54μm处发光机理

对于掺铒硅的光致发光来说,实验表明,Er³⁺的光吸收截面非常小,只有3×10⁻²¹cm²^[14],这使得光直接激发Er³⁺几率很小。Coffa等利用时间分辨谱得

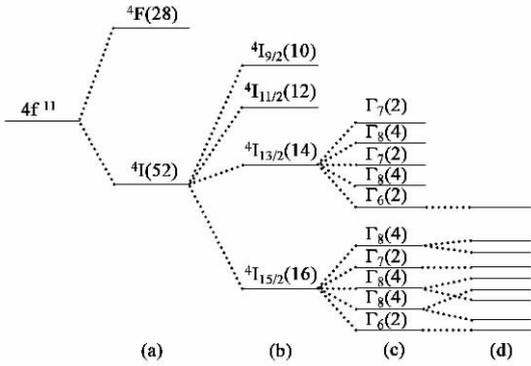


图1 Er³⁺的4f¹¹电子组态在晶场中的能级分裂

到了在4K温度下Er³⁺的激发时间约为50μs,而在掺铒硅中所激发产生的过剩载流子寿命比该时间短得多.实验结果表明,通过吸收光子直接激发Er³⁺的几率确实很小^[15].此外,理论计算表明,电子、空穴直接通过带-带跃迁复合经俄歇过程将能量传递给Er³⁺的可能性也很小^[16].因此,掺铒硅中Er³⁺的激发应该是通过基质的能量传递作用来实现的,Ng等得到的掺铒硅激发光谱直接证实了该结论^[17].

目前就掺铒硅在1.54μm处光致发光机理来说,Yassievich等提出的通过束缚激子复合俄歇激发Er³⁺的发光机制已被广泛接受^[16].

具体发光过程如下(见图2):

- (1)在光激发下,基质中产生非平衡的过剩电子、空穴载流子.
- (2)电子、空穴对受陷于基质禁带中的施主能级E_T,形成束缚激子(A过程).
- (3)基质束缚激子复合经俄歇过程将能量传递给Er³⁺的4f电子(B过程),使Er³⁺从基态I_{15/2}跃迁到第一激发态I_{13/2}.
- (4)处于激发态的Er³⁺的4f电子跃迁回基态辐射出1.54μm波长的光子(C过程).

同时还存在与上述各过程平行竞争的其他过程(见图2),包括:

- (1)与A过程相竞争的过程:基质电子、空穴直接通过带-带跃迁复合发光(A₁过程)和电子、空穴通过基质深中心进行无辐射复合(A₂过程).
- (2)与B过程相竞争的过程:基质束缚激子复合发光(B₁过程)和束缚激子在热扰动下所发生的热离化(B₂过程).
- (3)与C过程相竞争的能量背传递过程^[6]和俄歇过程^[20]:处于激发态Er³⁺的4f电子在基质声子的参与下把能量反向传递给晶体基质,将基质价带

电子激发到与铒有关的某个能级(该能级可能与起激发通道作用的能级是同一个能级,但也有研究表明,这两个能级可以不同)再次形成束缚激子,这一过程与激发过程相反因此被称为能量背传递过程(C₁过程).另外,被激发到基质该能级上的电子也可在声子的参与下进一步被热离化到导带(B₂过程),该电子也可跃迁回价带再次激发Er³⁺.处于激发态的Er³⁺,也会把能量传递给基质束缚激子热离化后所产生的激子导带上的电子或未形成激子的导带上的电子,使他们形成过热电子,该过热电子再通过无辐射过程弛豫到导带底,这就是使发光效率降低的俄歇过程(C₂过程).

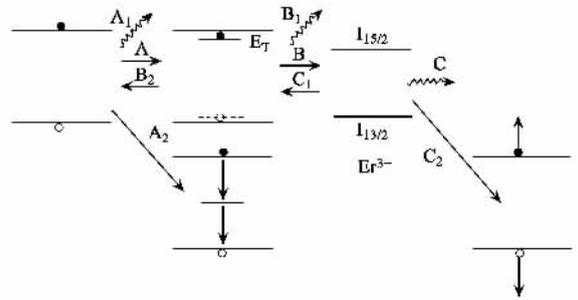


图2 掺铒硅中Er³⁺的激发和退激发模型

2.4 影响Er³⁺激发效率及发光效率的主要因素

从以上掺铒硅在1.54μm处发光过程分析可知,与Er³⁺激发相竞争的A₁,A₂过程,B₁,B₂过程以及与Er³⁺辐射退激发相竞争的C₁,C₂过程均会在不同程度上影响掺铒硅中Er³⁺的激发效率及发光效率.

实际上,A₁和B₁过程发生的几率非常小,发光光谱上也没有观察到对应的光谱结构,可以忽略.高温下,载流子的热离化B₂相当严重,热离化若发生在能量传递之前,使激发Er³⁺的几率大大降低^[19].A₂过程可在很大程度上影响Er³⁺的激发效率,因为基质电子、空穴最容易通过深中心进行无辐射复合,即使材料中只有少量的深中心也会大大降低发光效率.

能量背传递过程和俄歇过程^[20]是两种最重要的与Er³⁺发光相竞争的无辐射过程,严重影响Er³⁺的发光效率.对于能量背传递过程C₁来说,Er³⁺退激发的能量比使基质价带电子激发到与铒相关的某个能级所需的能量要低,尚差的这一部分能量需要靠基质声子来提供,即与基质声子和Er³⁺的4f电子之间的耦合程度相关.温度愈高,耦合程度愈强,C₁过程愈易发生,因此,基质载流子的热离化也总伴随

着此过程. 与该过程相关的基质杂质能级密度以及电子占据该能级的概率(由费米能级的位置决定)也影响着能量背传递过程的发生. 能级密度愈高, 电子占据能级的概率愈大, C_1 过程愈易发生. 这些都大大降低 Er^{3+} 的发光效率. 此外, 只要体系存在自由载流子, 俄歇过程 C_2 就不可避免, 事实上该过程在低温时就已经起作用了. C_2 过程同基质载流子末态态密度和载流子的浓度密切相关, 载流子的浓度又同费米能级的位置和温度有关, 因此在费米能级位置不变的情况下, 该过程导致温度猝灭现象出现.

3 掺钇硅发光材料存在的问题

虽然在二十年前人们就已经实现了掺钇硅的电致发光^[4], 但直到目前仍存在着发光效率低、温度猝灭等问题, 制约着掺钇硅的实用化.

首先, 钇在单晶硅中的固溶度很低, Er^{3+} 的浓度小. Michel 等^[6]很早就提出钇在硅中的固溶度不超过 10^{18} cm^{-3} . 尽管当时考虑了杂质的影响, 后来的研究表明, 还是过高地估计了钇在硅中的固溶度. 离子注入实验研究表明, 超过一定浓度后, 经退火后会形成无光学活性沉淀 $ErSi_2$ ^[21, 22]. Serna 等通过 MBE 生长的样品经退火研究表明, 超过一定浓度后钇会聚集到表面附近^[23]. 实际上, 钇在纯净的单晶硅中的平衡固溶度还没有定论, 不过已有证据表明不会超过 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ^[24]. 要满足实用的要求, Er^{3+} 的浓度至少要达到 10^{18} cm^{-3} , 因此 Er^{3+} 的浓度成为限制掺钇硅发光效率的一个主要因素.

其次, 掺钇硅中具有光学活性的钇所占比例低. Michel 等认为, 钇在硅中主要为 +2 价态, 不具有光学活性^[6], 就钇在硅中价态这一点来说仍有很大争议. 一般认为钇在硅中主要为 +3 价态, 只是缺乏有效的激发通道^[21]或存在高效的无辐射退激发^[25]. 此外, 钇在硅中也像其他重金属元素一样会在禁带中引入深能级, 这在很大程度上减少了起激发 Er^{3+} 作用的电子-空穴对的数量, 从而大大降低了掺钇硅的发光效率. 掺钇硅的发光效率主要受哪种机制影响目前仍然不清楚, 也可能是上述几种机制共同起作用.

最后, 掺钇硅发光存在严重的温度猝灭. Kik 等人证明掺钇硅体系在温度 150K 下的发光强度比在 12K 时下降了 1000 倍^[26], 而室温下几乎探测不到发光, 分析发现温度猝灭主要由退激发过程中的俄歇过程和能量背传递过程引起的. 因此温度猝灭现

象成为制约实用化的最主要因素.

4 共掺氧或其他轻元素改善掺钇硅材料发光性能

由于掺钇硅发光材料存在的上述问题, 利用该材料很难实现硅基光源, 更无法应用于光电子集成领域. 不过, Michel 等通过将钇掺入直拉硅 Cz-Si (含氧量高)和区熔硅 FZ-Si (含氧量低)中, 发现掺钇 Cz-Si 不仅发光效率提高, 而且能更好地抑制温度猝灭效应^[6]. 后来众多的钇氧共掺实验均得到了相似的结果, 氧被认为能对钇的发光起重要作用, 共掺氧也被认为是一种改善掺钇硅发光性能的有效手段, 研究人员已经从各个方面讨论了氧的作用.

(1) 共掺氧或其他轻元素 (C, N, F) 可以大大提高钇在硅中的固溶度, 且已接近 $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ^[27]. 提高钇的固溶度是增加具有光学活性的钇的含量进而提高掺钇硅体系发光效率的前提条件. 众多研究表明, 如果基质中氧的含量很多(如 Cz-Si)或钇氧共掺, 均会使钇在硅中的固溶度提高至少两个数量级. 万钧等人的理论计算表明, 这可能是由于 Si-O-Er 体系的形成能大大低于 Si-Er 的形成能的缘故. 另外, 钇氧的共掺也能提高氧的固溶度, 固溶度的提高是钇氧之间有很强的相互作用所致. 众多研究均表明, 在钇氧共掺硅中形成了钇氧的某种络合物^[6, 26, 28], 且在硅中固溶度很高, 从而提高了钇的固溶度. 络合物的形成可阻止钇的迁移, 能抑制高温退火时钇的析出, 降低沉淀形成的几率^[29].

(2) 共掺氧可增强钇的光学活性^[30], 且有利于在钇中心处形成束缚激子. 氧有比较大的电负性, 可与钇相互作用形成局域的近离子型微环境并减弱 Er-Si 的共价作用, 从而使钇更容易表现 +3 价, 增强钇的光学活性. 同时, 具有大电负性的氧可以增加钇中心捕获电子-空穴对的截面, 从而更有效地起到复合中心的作用^[31]. 就以上这两点来说, 其他具有比较大电负性的轻元素 (C, N, F) 在增强发光方面也有类似作用.

(3) 共掺氧可以引入起发光通道作用的施主能级^[32-34]. Libertino 等的研究表明, 由于氧的存在会大大减少对发光有害的深能级的浓度, 同时由于与钇氧有关的络合物的形成会引入比较浅的施主能级 ($E_c \approx 0.15 \text{ eV}$), 该能级对 Er^{3+} 的发光起重要作用, 但也与能量背传递过程直接相关^[33]. Er^{3+} 退激发的

能量为 0.81eV, 硅的禁带宽度为 1.11eV, 要使价带电子激发到该施主能级上, 尚差 0.15 eV, 这一能量需要靠声子来提供, 因此需要热激活能 0.15eV(对应的温度为 150K)。尽管共掺氧能降低深能级浓度, 从而提高载流子寿命并间接地降低温度猝灭效应, 可是温度在 150K 以上时, 能量背传递过程起主要作用, 所以温度猝灭仍比较严重^[19]。

(4) 氧和钇形成的局域微环境可以降低温度猝灭效应。由于钇被 6 个氧原子所包围, Anderson 提出这些氧原子形成了笼结构, 可起到使钇从起激发作用的基质隔离出来的作用, 这会减弱 Er^{3+} 的 4f 与硅基质之间的晶格振动耦合, 使声子参与的能量背传递过程发生的几率降低, 从而抑制温度猝灭效应^[31]。

综上所述, 氧对提高钇发光效率有多重作用。鉴于此, 研究人员对共掺氧展开了广泛研究, 且取得了比较显著的成果。如 Coffa 等通过共掺实现了室温下的电致发光, 但存在的问题仍然是室温下的发光效率不高^[35], 无法满足商用要求。

5 进一步提高掺钇硅基材料发光效率的途径

进一步提高掺钇硅基发光材料在 1.54 μm 处的发光效率, 可以从三个主要方面进行考虑 (1) 提高具有光学活性钇的浓度 (2) 提高具有光学活性钇的激发效率 (3) 提高已被激发钇的发光效率。下面给出进一步提高掺钇硅基材料发光效率的几条途径。

5.1 钇掺入宽带半导体

通过共掺氧基本实现了提高具有光学活性钇浓度的目的, 同时也大大强化了材料的施主特性, 致使导带电子大量增加, 强化了无辐射的俄歇过程。此外, 能量背传递过程不能通过共掺氧得到很好的抑制。虽然共掺氧后会在硅中引入起发光通道作用的比较适当的施主能级, 但由于硅带隙宽度的限制, 使体系发生能量背传递过程的热激活能不可能太大, 所以温度猝灭效应仍比较显著。就俄歇过程和能量背传递过程来说, 从前面有关影响 Er^{3+} 发光效率的因素可知, 这两个过程都由体系的费米能级和与钇相关能级的位置所决定, 硅带隙宽度限制了相应能级在禁带中位置的调整。

基于上述考虑, 拓宽基质带隙是一种可行的方

法。目前, 已探索过的宽或较宽的带隙的基质材料有 SiC ^[36]、 SiN ^[37]、氢化非晶硅^[38]等, 证明均可在不同程度上减弱钇离子发光的温度猝灭效应。其中 SiC 是很具吸引力的一种基质材料, 这不仅因为 SiC 一直在发光器件方面表现出优越的性能, 更主要的是 SiC 作为第三代半导体材料具有各种优异的半导体特性, 且与硅工艺相容, 目前国际上 SiC 基半导体技术自身发展也很迅速, 已逐渐走上了商业化道路。早在 1994 年, Choyke 等就通过离子注入技术将钇注入不同结构(4H, 6H, 15R 和 3C)的 SiC 中, 并研究了不同温度下的光致发光谱, 发现尽管在温度升高到 400K 时, 发光谱在 1.54 μm 附近由很锐的谱线演变成了许多宽化的一系列次峰, 但相对积分强度(积分区间在 1.49—1.64 μm 波长范围)在 400K 下几乎不发生变化, 直到 500K 时也只降低 10 倍, 而掺钇硅体系在 300K 时已发生严重的温度猝灭效应, 这表明 SiC 在抑制温度猝灭方面确实表现出了突出的优势^[36]。后来 Uekusa 等再次证实了以 SiC 为基质掺钇发光材料具有很好的室温发光性能, 并证明体系中与离子相关的光致发光不是由于钇直接吸收激发光能量而产生的, 初步提出了一个与掺钇硅材料相似的能量传递及发光模型^[39]。目前国际上对掺钇 SiC 的研究还很不充分, 仍有大量的工作要做。

5.2 钇掺入富硅 SiO_2

Lombardo 等人在 1993 年首次将钇掺入了富硅 SiO_2 中, 得到了较强的室温发光^[40]。引人注意的是, 此材料中不仅含有丰富的氧以保证具有光学活性钇的浓度, 更主要的是该材料经适当退火后会形成硅和 SiO_2 相分离, 形成的纳米硅团簇镶嵌在 SiO_2 基质中, 有望利用纳米材料所具有的独特性能来改善掺钇硅基发光材料的性能。

近年来, 对掺钇富硅 SiO_2 进行了大量的研究工作, 并取得了相当大的进展。研究表明, 发光的钇不是存在于纳米硅团簇内, 而是存在于 SiO_2 基质中。纳米硅团簇经激发后会在内部形成受限的电子-空穴对, 其复合后将能量传递给与其距离很近的 Er^{3+} , 这种传递过程的发生几率随着 Er^{3+} 与纳米硅团簇距离的增加而急剧下降, 只在 1—2nm 范围内才起作用^[25]。大量研究表明, 纳米硅团簇在钇的发光过程中起到传统的敏化剂的作用。低温下该体系发光强度比掺钇硅体系高, 表明 Er^{3+} 可以被有效激发, Kik 等估计约为 55%^[41]。当然, 钇的退激发也有可能使能量背传递发生, 但由于量子限制效应使纳

米硅的带隙变宽,从而有效地抑制了能量背传递.由于发光的 Er^{3+} 不在纳米硅团簇内部,使得纳米硅团簇的晶格振动与 Er^{3+} 之间的耦合很弱,进一步降低了声子参与的能量背传递过程发生的几率.以上两个方面均能降低温度猝灭效应,从而可以大大提高 Er^{3+} 的室温的发光效率.

另外,掺铒富硅 SiO_2 也有很好的电学性能,利用该材料制成的电致发光器件在室温下的量子效率已接近商用的水平 1%^[42],目前面临的问题是该材料是一种典型的非均匀两相共存体系,难于将铒精确控制在 SiO_2 中.

5.3 铒掺入 Si/SiO_2 超晶格

Shin 等为克服掺铒的富硅 SiO_2 的缺点,提出了一种利用超晶格设计新材料的方法.他们分别在 Si/SiO_2 超晶格的 SiO_2 和 Si 层中掺入铒,结果发现两种样品均能在一定程度上抑制温度猝灭效应,且铒掺入 SiO_2 层中的样品在低温的发光强度明显优于铒掺入 Si 层的样品,有更好的抑制温度猝灭特性,其室温下积分发光强度仅下降了温度在 20K 时的 3 倍^[43].

激发光谱的分析表明,掺入 SiO_2 层的 Er^{3+} 的激发也是通过硅的能量传递作用间接发生的.这表明,即使 Er^{3+} 与起激发作用的硅分离,也可有效激发 Er^{3+} . 低温下高强度的发光主要是 SiO_2 层中丰富的氧为提供大量具有光学活性的铒创造了有利条件.就抑制温度猝灭来说,由于 Er^{3+} 与硅层分离,降低了 Er^{3+} 的 4f 电子与起激发 Er^{3+} 作用的硅层内声子的耦合,从而抑制了能量背传递的发生.最近,Shin 等又在 Si/SiO_2 超晶格的 SiO_2 层和 Si 层之间加了一极薄的 SiO_2 缓冲层,几乎完全抑制了温度猝灭效应,且获得了一个惊人的结果:加了 SiO_2 缓冲层的材料其发光强度比不加缓冲层的材料提高了 3 个数量级以上^[44],他们用 Qin 等^[45]提出的硅中激子隧穿进入 SiO_2 层内的机制进行了解释.不过从理论上讲,加入缓冲层后,激子隧穿激发几率无疑会下降,从而降低铒的激发效率,发光强度无论如何都会下降,所以可能还有别的机制在起作用,需要进一步研究.由于这种材料有很好的发光性能,预计在制作光源上会有突出表现.

6 展望

综上所述,人们对掺铒硅基材料的发光已经做了广泛的研究,并取得了较大的进展.目前人们已经

得到了掺铒硅基光纤放大器^[46],而且成功制作出强烈室温发光的异质结双极性三极管. Michel 等早在 1996 年就已经论证了利用掺铒硅基发光材料实现硅基光电子集成的可行性^[47].随着对掺铒硅基发光材料的深入研究,硅基光电子集成的实现不再遥远.

参 考 文 献

- [1] Bell R L. J. Appl. Phys., 1963, 34: 1563
- [2] 王启明. 物理学进展, 1996, 16(1): 75 [Wang Q M. Progress in Physics, 1996, 16(1): 75 (in Chinese)]
- [3] Ennen H, Schneider J, Pomrenke G *et al.* Appl. Phys. Lett., 1983, 43: 943
- [4] Ennen H, Pomrenke G, Axmann A *et al.* Appl. Phys. Lett., 1985, 46: 381
- [5] Ennen H, Pomrenke G, Axmann A. J. Appl. Phys., 1988, 57: 2182
- [6] Michel J, Benton J L, Ferrante R F *et al.* J. Appl. Phys., 1991, 70: 2672
- [7] Jhe J-H, Shin J H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 82: 4489
- [8] Przybylinska H, Jantsch W *et al.* Phys. Rev. B, 1996, 54: 2532
- [9] 万钧, 叶令, 王迅. 物理学报, 1998, 47(4): 652 [Wan J, Ye L, Wang X. Acta Physica Sinica, 1998, 47(4): 652 (in Chinese)]
- [10] Wan J, Ling Y, Sun Q *et al.* Phys. Rev. B, 1998, 58: 10415
- [11] Hashimoto M, Yanase A, Harima H *et al.* Physica B, 2001, 308—310: 378
- [12] Assali L V C, Gan F, Kimerling L C *et al.* Appl. Phys. A, 2003, 76: 991
- [13] Tang Y S, Heasman K C, Gillin W P *et al.* Appl. Phys. Lett., 1989, 55: 432
- [14] Takahei K, Taguchi A. Mater. Sci. Forum, 1992, 83—87: 641
- [15] Coffa S, Franzò G, Priolo F. Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 2077
- [16] Yassievich I N, Kimerling L C. Semiconduct. Sci. Technol., 1993, 8: 718
- [17] Ng W L, Temple M P, Childs P A *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 75: 97
- [18] Taguchi A, Nakagome H, Takahei K. J. Appl. Phys., 1991, 70: 5604
- [19] Priolo F, Franzò G, Coffa S *et al.* J. Appl. Phys., 1995, 78: 3874
- [20] Priolo F, Franzò G, Coffa S *et al.* Phys. Rev. B, 1998, 57: 4443
- [21] Gong M L, Shi J X, Wong W K *et al.* Appl. Phys. A, 1999, 68: 10
- [22] Eaglesham D J, Michel J, Fitzgerald E A *et al.* Appl. Phys. Lett., 1991, 58: 2797
- [23] Serina R, Lohmeier M, Zagwijn P M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1995, 66: 1385
- [24] Ren F Y G, Michel J *et al.* Rare Earth Doped Semiconductors. In: edited by Pomrenke G S, Klein P B, Langer D W. MRS Symposia Proceedings, No. 301. Pittsburgh: Materials Research Society, 1993, 87
- [25] Franzò G, Vinciguerra V, Priolo F. Appl. Phys. A, 1999, 69: 3

[26] Kik P G , de Dood M J A , Kikoin K *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1997 , 70 : 1721

[27] Scalse S , Franzò G *et al.* J. Appl. Phys. , 2000 , 88 #091

[28] Adler D L , Jacobson D C , Eaglesham D J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1992 , 61 2181

[29] Coffa S , Priolo F , Franzò G *et al.* Phys. Rev. B , 1993 , 48 : 11782

[30] Cavallini A , Fraboni B , Pizzini S. Appl. Phys. Lett. , 1998 , 72 #68

[31] Anderson F G. Appl. Phys. Lett. , 1996 , 68 2421

[32] Benton J L , Michel J , Kimerling L C *et al.* J. Appl. Phys. , 1991 , 70 2667

[33] Libertino S , Coffa S , Franzò G *et al.* J. Appl. Phys. , 1995 , 78 3867

[34] Priolo F , Coffa S , Franzò G *et al.* J. Appl. Phys. , 1993 , 74 : 4936

[35] Coffa S , Franzò G , Priolo F *et al.* Phys. Rev. B , 1994 , 49 : 16313

[36] Choyke W J , Devaty R P , Clemen L L *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1994 , 65 1668

[37] Zanatta A R , Nunes L A O. Appl. Phys. Lett. , 1998 , 72 : 3127

[38] Fuhne W , Ulber I , Weiser G *et al.* Phys. Rev. B , 1995 , 56 : 9545

[39] Uekusa S -I , Awahara K , Kumagai M. IEEE Trans. Electron devices , 1999 #6 572

[40] Lombardo S , Campisano S U *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1993 , 63 1942

[41] Kik P G , Brongersma M L , Polman A. Appl. Phys. Lett. , 2000 #76 2325

[42] Iacona F , Pacifici D , Irrera A *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 , 81 3242

[43] Shin J H , Lee W -H , Han H -S. Appl. Phys. Lett. , 1999 , 74 1573

[44] Shin J H , Jhe J -H , Seo S -Y *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000 , 76 3567

[45] Qin G G , Wang Y Q , Qiao Y P *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1999 , 74 2182

[46] Du C -X , Duteil F , Hansson G V *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 , 78 1697

[47] Michel J , Zheng B , Palm J *et al.* Mat. Res. Soc. Symp. Proc. , 1996 , 422 317

[48] 陈维德. 物理 , 1999 , 28 (12) : 741 [Chen W D. Wuli (Physics) , 1999 , 28 (12) : 741(in Chinese)]

[49] Judd B R. Phys. Rev. , 1962 , 127 750

[50] Ofelt G S. J. Chem. Phys. , 1962 , 37 511

· 招生招聘 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

April , 2005

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics and photonics , Nano-Particles Physics , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email : gradphysics@rpi.edu