

硅基光源的研究进展

沈浩 李东升 杨德仁

Research progress of silicon light source

Shen Hao Li Dong-Sheng Yang De-Ren

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 204208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅基槽式微环谐振腔型偏振解复用器全矢量分析

Full-vectorial analysis of a polarization demultiplexer using a microring resonator with silicon-based slot waveguides

物理学报.2015, 64(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194207>

硅基光子集成研究进展

Research progress of silicon-based photonic integration

物理学报.2014, 63(10): 104218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104218>

基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基高速电光调制器设计

Design of a high-speed silicon electro-optical modulator based on an add-drop micro-ring resonator

物理学报.2013, 62(19): 194210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194210>

基于热膨胀效应的可调光功率分束器设计

Design of tunable optical power splitter based on thermal expansion effect

物理学报.2013, 62(2): 024218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024218>

TE-TM 模变换型光波导隔离器的理论研究

Operation principle of optical waveguide isolator based on TE-TM mode conversion

物理学报.2012, 61(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164201>

## 专题: 硅基光电子物理和器件

**编者按** 半导体科学技术的出现和发展为人类社会的生产和生活带来前所未有的变革. 半导体科学技术是信息产业的核心和基础, 是推动传统工业转型升级的物质支撑, 是支撑经济社会发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性基石. 特别是作为半导体技术之一的微电子技术, 不但自身是一个庞大的产业, 它还作为核心部件在不断推动其他科技应用的迅速发展, 从国防科技、现代工业到日常生活, 各个领域无不渗透着半导体微电子技术. 半导体科学技术已经成为一种既代表国家现代化工业水平又与人民生活息息相关的基础性高新技术, 我们无法想象如果它在将来停止继续往前发展了会怎么样? 随着晶体管的不断缩小, 芯片集成度的不断提高, 晶体管间的电互连面临包括散热、串扰、延迟在内的一系列问题, 成为限制集成电路进一步发展的主要阻力. 最新的 14 nm 工艺, 金属导线的最小间距只有 52 nm, 线宽只有几个纳米, 已经非常接近物理极限. 在同一芯片上集成光子学器件和电子学器件用光互连代替电互连的光电集成技术有望解决这一难题, 硅基光互连具有高速度、高带宽、低功耗、可集成等特点. 光互连的实现还将为进一步集成量子器件提供必要条件. 目前硅基光电探测器、电光调制器、波分复用器、光波导等都已成功实现, 但由于硅的间接带隙特点导致真正能够实用的硅基光源仍悬而未决. 实现硅基发光器件成为实现硅基光电集成技术最具挑战和最重要的目标. 本刊组织的“硅基光电子物理和器件”专题从理论设计高效发光硅锗超晶格, 包括量子效应低维硅, 硅基稀土掺杂, 硅中缺陷发光和硅基锗材料在内的各种硅基发光材料制备、高迁移率锗沟道器件、硅基 IV 族异质结构发光器件和硅基 III-V 族量子点激光器等几个方面对各种硅基光源目前面临的问题和未来的发展方向进行系统的介绍和总结, 推动国内硅基发光器件的研究进展, 以期在国际上首先实现可实用的硅基发光器件.

(客座编辑: 中国科学院半导体研究所 骆军委, 李树深)

## 硅基光源的研究进展\*

沈浩 李东升<sup>†</sup> 杨德仁

(浙江大学材料科学与工程学院, 硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

(2015年7月7日收到; 2015年8月14日收到修改稿)

随着人们对大容量、高速和低成本的信息传播的要求越来越迫切, 近年来硅基光电子学得以蓬勃发展, 但硅基光源一直没有得到真正的解决, 成为制约硅基光电子学发展的瓶颈. 硅的间接带隙本质给高效硅基光源的实现带来很大困难, 实用化的硅基激光是半导体科学家长期奋斗的目标. 本文分别介绍了硅基发光材料、硅基发光二极管和硅基激光的研究进展, 最后总结了目前各种硅基光源面临的问题和未来的发展方向.

**关键词:** 硅基发光材料, 硅基发光二极管, 硅基激光, 光电集成

**PACS:** 42.82.-m, 42.70.-a, 85.60.Jb, 42.55.Px

**DOI:** 10.7498/aps.64.204208

## 1 引言

在 20 世纪, 硅材料对人类的生产和生活都产生了巨大的影响, 通过半导体集成电路构成了现代信息产业发展的基石. 40 多年来, 集成电路遵循

“摩尔定律”飞速发展, 特征尺寸不断缩小, 已经从最初的微米级缩小到 14 nm, 很快将达到 10 nm; 相应地, 电路内金属互连的结构复杂程度越来越高, 互连技术正朝着高速率和高密度集成发展, 以满足目前大容量和高速率传输的需要. 然而, 随着晶体管特征尺寸的不断减小, 电互连面临着信号延迟

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB632102)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: mselds@zju.edu.cn

大、传输带宽小、信号串扰大、功耗大、加工困难、成本高等局限<sup>[1]</sup>,集成度提高的速度减慢甚至趋于停滞.为此,将微电子和光电子结合起来,充分发挥硅基微电子先进成熟的工艺技术、高密度集成、价格低廉以及光子极高带宽、超快传输速率和高抗干扰性的优势,硅基光电子学已经成为信息技术发展的必然和业界的普遍共识,被认为是片上光互连最具有潜力的方案<sup>[2-4]</sup>.

我们知道,想要实现光互连替代电互连有赖于基础光电子器件的突破.当前光通信的一个发展趋势是实现集成化,类似于集成电路,将光通信系统集成在单一光电子芯片上,只有集成化才能实现高密度、低成本、低能耗,满足信息社会信息急速膨胀的需求<sup>[5]</sup>.近年来,硅基光电集成取得了一系列令人振奋的成果,如硅基光波导<sup>[6-8]</sup>、光开关<sup>[9-11]</sup>、调制器<sup>[12-15]</sup>以及探测器<sup>[16-18]</sup>均已实现,但真正能够实用的硅基光源仍悬而未决.这主要由于硅是间接带隙半导体,辐射复合过程需要声子的参与,因而发光效率很低.但人们一直没有放弃追寻提高硅基发光效率的方法,近年来在硅基发光上取得了一系列突破,包括材料和器件的制备以及理论的完善.如2005年成功得到全光硅拉曼激光<sup>[19,20]</sup>,2012年实现室温电致Ge激光器<sup>[21,22]</sup>,2015年又突破了硅上GeSn激光<sup>[23]</sup>以及2010年硅上III-V激光的一系列新进展<sup>[24-28]</sup>.

## 2 硅基发光材料

自1990年Canham<sup>[29]</sup>报道了室温下多孔硅可以发出较强的可见光以来,硅基材料的发光效率得到了极大的提高.目前主要的硅基发光材料有量子效应低维硅、硅中杂质和缺陷发光、利用能带理论设计直接带隙材料和硅基化合物半导体材料.下面主要介绍几类常见的硅基发光材料.

### 2.1 量子效应低维硅

多孔硅大多是用电化学腐蚀硅片得到的<sup>[30,31]</sup>,表面含有孔洞和硅纳米晶粒.室温下多孔硅的发光波段较宽,已经覆盖了从红外到紫外的范围<sup>[32]</sup>,而且随着表面硅纳米晶粒尺寸减小其发光峰位也逐渐蓝移.自20世纪90年代以来,多孔硅的发光研究历经20多年,取得了一系列理论和实验上的成果.关于多孔硅的发光机理主要有以下三种:

- 1) 量子限制发光中心模型<sup>[33]</sup>;
- 2) 与氧相关的缺陷发光模型<sup>[34]</sup>;
- 3) 量子限制-发光中心模型<sup>[35]</sup>.

硅纳米晶(silicon nanocrystal, Si NC)一般指直径在几个纳米范围内的硅晶体颗粒,和多孔硅一样可以发出较强的可见光,研究者对硅纳米晶的光致发光和电致发光均做了一定研究.硅纳米晶根据制备方式的不同,可以分为独立的(freestanding)纳米晶和薄膜基质中的纳米晶.

一般独立的硅纳米晶主要是采用等离子体增强分解硅烷( $\text{SiH}_4$ )来制备,同时可以进行硼(B)、氮(N)和磷(P)的掺杂.浙江大学杨德仁课题组在这一方面也做了许多有创新性的工作,其研究了杂质和表面对硅纳米晶体颗粒光学行为的影响,结合计算和实验,首次明确了掺入的B和P杂质在硅纳米晶体颗粒中(包括表面)最有可能存在的形态,并自洽地解释了掺B或P对硅纳米晶体颗粒的红外吸收和发光的影响<sup>[36-38]</sup>.之前研究人员对Mn杂质的研究主要着眼于它对硅纳米晶体颗粒磁学性质的影响.而杨德仁等的工作则着眼于光学性能,阐明了Mn杂质对硅纳米晶体颗粒的光学带隙和光吸收的影响<sup>[39]</sup>;Cl, F, C和N等是在硅纳米晶体颗粒合成或处理过程中经常遇到的杂质,他们还研究了Cl, F和C杂质在硅纳米晶体颗粒表面的覆盖影响硅纳米晶体颗粒光吸收和发光的机理<sup>[40-43]</sup>;确定了N在硅纳米晶体颗粒中存在的形态及位置,进而展示了掺N的硅纳米晶体的吸收和发光光谱<sup>[44]</sup>.同时系统研究了表面初始被氢或氯钝化的硅纳米晶体颗粒在表面改性后所导致的硅纳米晶体颗粒的表面成键情况,以及所形成的表面效应对硅纳米晶体颗粒的光学性能的影响<sup>[45,46]</sup>.这些工作为研究硅纳米晶体颗粒的杂质和表面效应的影响打下基础.除了采用分解 $\text{SiH}_4$ 方法之外,还可以通过等离子体刻蚀<sup>[47]</sup>、光刻等<sup>[48]</sup>方法直接在硅片表面形成硅纳米晶结构.

而薄膜基质中纳米晶发光的研究相较于独立纳米晶发光更加广泛.为了在薄膜中获得硅纳米晶,一般可以采用离子注入<sup>[49]</sup>、化学气相沉积(CVD)<sup>[50,51]</sup>和物理气相沉积等<sup>[52,53]</sup>先制备硅组分富集的薄膜,再通过后续高温热处理使富余的硅析出.基质的选择也多种多样,可以是氧化硅、氮化硅和碳化硅等成本较低且与现行集成电路工艺兼容的薄膜材料.但上述的一些方法制备出来的硅纳

米晶通常尺寸分布都比较宽, 不利于其发光的研究和应用, 进而又发展了一些尺寸可控的硅纳米晶制备方法, 如可以先制备  $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$  超晶格结构, 然后通过高温退火使很薄的富硅层  $\text{SiO}_x$  发生相分离, 这样获得的硅纳米晶尺寸受  $\text{SiO}_x$  厚度限制 [54]. 硅纳米晶的发光同样可以用量子限制模型来解释, 但其表面效应不能忽视. 上述的薄膜基质的作用都是类似的, 起到势垒层的作用, 可以限制载流子在纳米硅表面的作用, 但是电子和空穴的注入势垒不一致. 图 1 分别给出了氧化硅、氮化硅和碳化硅三种不同基质的能带结构简图 [55,56]. 从图中可以看出氮化硅和碳化硅较氧化硅基质电子和空穴的注入相对容易且更平衡; 但是势垒高度降低会造成对载流子限制作用的减弱, 从而使部分载流子逃逸出势阱而不参与辐射复合 [56]. 故而在制备器件时对薄膜基质的选择需要谨慎.

### 2.2 硅基稀土掺杂

众所周知, 稀土材料具有独特的 4f 能级系统, 内部跃迁辐射复合发光受基体和温度等外因影响较小, 通常呈尖锐的特征峰; 且能级结构丰富可以发出不同波长的光满足不同需要, 所以很早就开展了硅基稀土元素的发光研究 [57,58]. 其中, 稀土元素中的 Er 是自由的  $\text{Er}^{3+}$  时, 根据偶极选择定则其辐射跃迁是禁戒的. 而掺进基体中时, 受晶格场作用  $\text{Er}^{3+}$  能级发生劈裂从而 4f 能级之间可以发生跃迁, 如图 2 (a) 所示 [59]. 可以看出  $\text{Er}^{3+}$  的第一激发态跃迁至基态辐射出波长为  $1.53 \mu\text{m}$  的近红外光, 正好位于石英光纤的最低损耗窗口内, 因而引起了人们相当广泛的研究兴趣. 目前对掺铒的富硅氧化硅/氮化硅薄膜和铒的硅酸盐化合物这两种体系研究较多.

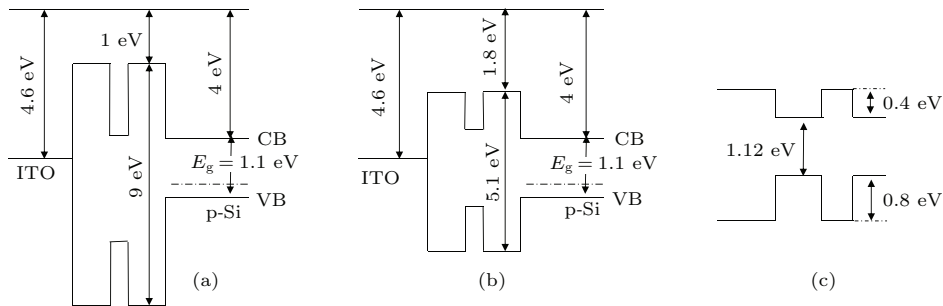


图 1 硅纳米晶嵌入氧化硅、氮化硅 [56]、碳化硅 [55] 基质中的能带结构示意图 (a)  $\text{SiO}_2/\text{Si NC}/\text{SiO}_2$ ; (b)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si NC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (c)  $\text{SiC}/\text{Si NC}/\text{SiC}$

Fig. 1. Band diagram of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [56],  $\text{SiC}$  [55] with buried Si NC: (a)  $\text{SiO}_2/\text{Si NC}/\text{SiO}_2$ ; (b)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si NC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ ; (c)  $\text{SiC}/\text{Si NC}/\text{SiC}$ .

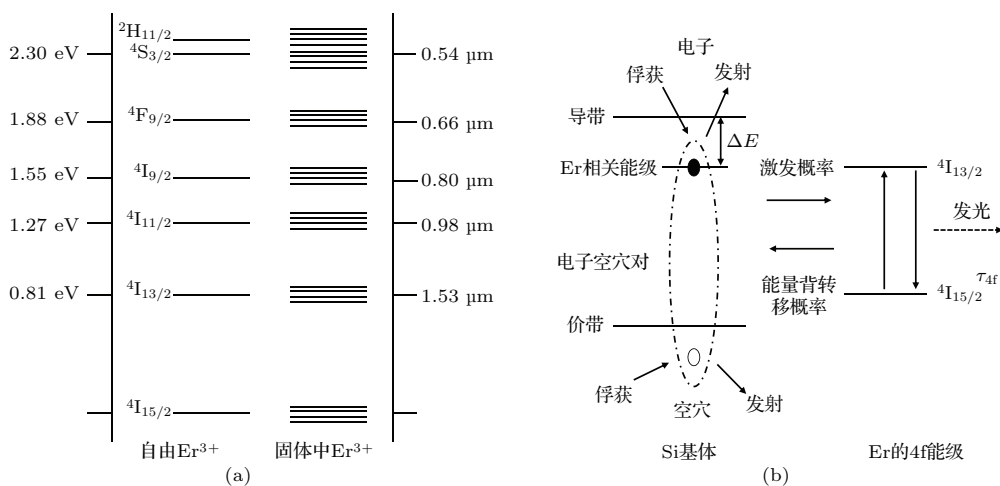


图 2 (a) 自由  $\text{Er}^{3+}$  和掺入固体中  $\text{Er}^{3+}$  能级图 [59]; (b) Si 中  $\text{Er}^{3+}$  能量传递过程 [60]

Fig. 2. (a) Schematic energy level diagram of  $\text{Er}^{3+}$  for a free ion and for an ion in a solid [59]; (b) schematic diagram of energy transfer processes [60].

当把铒掺杂入Si或SiO<sub>2</sub>中时,以掺入Si为例<sup>[60]</sup>,结合图2(b),Er<sup>3+</sup>在Si中会形成浅施主能级,位于导带(CB)下约0.15 eV位置.当用光激发时,会在铒相关能级形成束缚激子,激子复合后将能量传递给Er<sup>3+</sup>使之激发,从而再跃迁回至基态辐射出光.同时激发态的Er<sup>3+</sup>也可以将能量传回给Si,使价带(VB)上电子跃迁至Er相关能级,而自身发光猝灭,这即是能量背转移过程,这一过程需要声子辅助,从而温度越高越显著.另外,激发的Er<sup>3+</sup>还可以将能量传递给自由电子或空穴而退激发,即俄歇复合退激发,这一过程在自由载流子浓度较高时更为显著.从以上描述可以看出,Er<sup>3+</sup>掺杂于基体中会有严重的温度猝灭,同时掺杂浓度会受到固溶度的限制,且掺杂浓度过高会有非光学活性铒析出导致浓度猝灭现象<sup>[61]</sup>.

将铒直接掺进固体硅基体中存在难以克服的缺陷,自1994年Kenyon等<sup>[62]</sup>发现在嵌有纳米硅的SiO<sub>2</sub>基体中未观测到铒的特征吸收峰,且采用Er<sup>3+</sup>的非共振激发光也能观测到较强的Er<sup>3+</sup>发光,他们将此归因于基体中的纳米硅吸收了能量后传给Er<sup>3+</sup>,即纳米硅敏化Er<sup>3+</sup>发光.由于纳米硅的吸收截面比Er<sup>3+</sup>高得多,且纳米硅的吸收是连续的光谱,因而Er<sup>3+</sup>发光效率得到较大提高,大大推动了硅基掺铒材料的实用化.近些年,富硅基体中掺铒(氧化硅<sup>[63]</sup>,氮化硅<sup>[64]</sup>和氮氧化硅<sup>[65]</sup>)得到了广泛的研究.这些富硅基体通过高温热处理析出的纳米硅与Er<sup>3+</sup>发生作用<sup>[66]</sup>,将能量传递给Er<sup>3+</sup>,见图3的耦合示意图.研究认为,纳米硅和Er<sup>3+</sup>之间的能量传递机理主要是Förster机理<sup>[67]</sup>.而根据Förster机理,能量传递效率和距离的六次方成反比,所以只有在很小的范围内,硅纳米晶才能与Er<sup>3+</sup>有较强的耦合效应,该范围内的Er<sup>3+</sup>浓

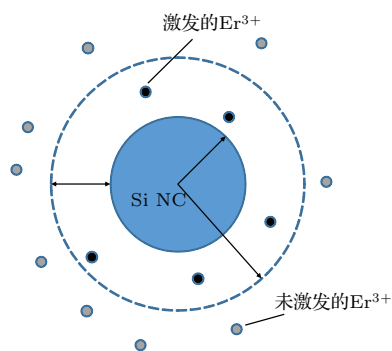


图3 硅纳米晶与Er<sup>3+</sup>的耦合示意图<sup>[66]</sup>

Fig. 3. The scheme of the coupling effect between Si nanocrystals and Er<sup>3+</sup><sup>[66]</sup>.

度很小,所以导致耦合效率不高,也就限制了发光效率的进一步提高.

上面提到的纳米硅可以传递吸收能量给Er<sup>3+</sup>来敏化其发光,但是传递距离有限,故而研究人员尝试寻找新的敏化剂. Savchyn等<sup>[68]</sup>研究发现,在600 °C热处理的掺铒富硅氧化硅薄膜中虽然并未析出硅纳米晶,但在非共振波长激发下仍观测到了Er<sup>3+</sup>发光,他们将此归因于薄膜中的发光中心起到了类似硅纳米晶的作用.同时,他们发现随热处理温度提高,发光中心逐渐消失,纳米硅逐渐析出,该过程见图4的示意图.发光中心为原子尺度,密度可以比硅纳米晶高很多,所以深入研究发光中心对Er<sup>3+</sup>的敏化作用很关键. Kanjilal等<sup>[69]</sup>和Jin等<sup>[70]</sup>都发现Si=O是主要的敏化中心.另外, Yerci等<sup>[71]</sup>发现在掺铒富硅氮化硅薄膜内发现带尾态可以起到敏化剂作用; Steveler等<sup>[72]</sup>指出热处理温度低于1000 °C都是带尾态起主要敏化作用,只在高于1100 °C时纳米硅才开始占据主导.

在掺铒体系中,受固溶度的限制,铒掺杂浓度一般低于10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>,且浓度过高会出现浓度猝灭现象<sup>[61]</sup>,这会限制材料获得大的光学增益,因此人们转向铒的化合物,如氧化铒和硅酸铒等.在铒的化合物中,Er作为组成元素,浓度提高两个数量级,且大大减少了Er<sup>3+</sup>之间的团聚. Miritello等<sup>[73]</sup>证实几乎所有的Er<sup>3+</sup>都具有光学活性,且制备过程可以与标准的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,这就为硅酸铒作为新的硅基光源打下了坚实基础. 2004年, Isshiki等<sup>[74]</sup>采用溶胶凝胶法制备出了一种新的Er硅酸盐化合物,发现该材料缺陷较少,且在1528 nm处有较强的室温光致发光,但采用的是共振波长激发,铒的吸收截面很小致使发光效率必然受到限制. Miritello等<sup>[73]</sup>利用射频磁控溅射制备了Er-Si-O/Si多层结构,证实可以形成纳米硅,且能够传递能量给Er<sup>3+</sup>实现敏化发光,从图5(a)中的光致激发谱(PLE)可以看出敏化效果较好.

铒硅酸盐化合物中Er的浓度很高,Er-Er之间距离很近,因此合作上转换效应很严重.人们希望通过加入与Er离子半径相近的钇(Y)和镱(Yb)来稀释Er,从而降低硅酸铒中的合作上转换. Wang等<sup>[75]</sup>研究发现,当Er:Yb=1:19时,光致发光强度比纯Er<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>提高了约两个数量级. Wang等<sup>[76]</sup>采用4能级模型计算了Er-Y硅酸盐化合物的光

增益和 $\text{Er}^{3+}$ 浓度、波导长度的关系,如图5(b)所示,发现理论上在1 mm波导长度下能够获得高于10 dB的光增益;但实验上一直制备不出理论上预期的高增益,Wang等[77]认为是波导中传输损耗

很大,高达8 dB/cm.令人振奋的是,2012年Yin等[78]制备出单晶的钪氟硅酸盐化合物纳米线,由于是单晶结构,表面的缺陷很少,这样传输损耗大大减小.此外,尽管Er浓度很高,但是荧光寿命高

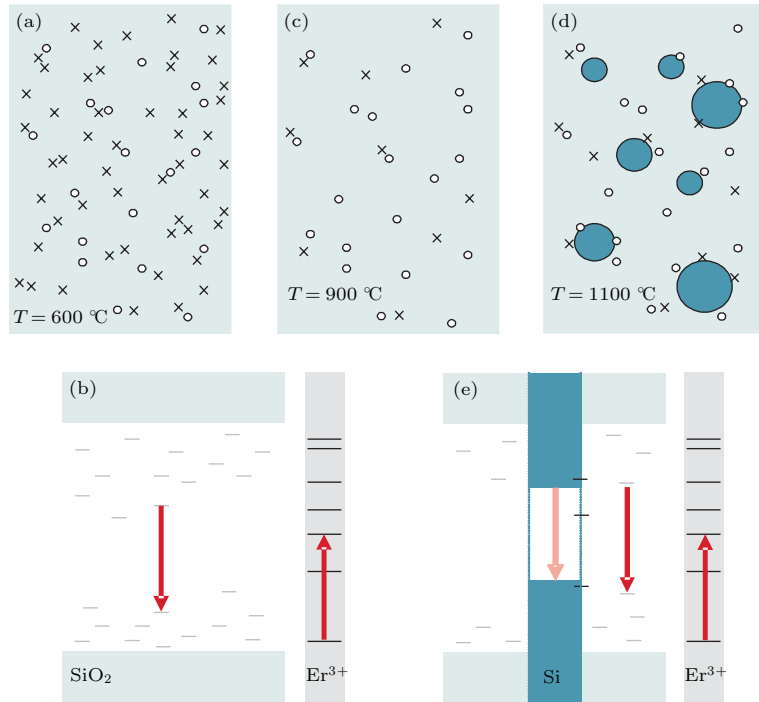


图4 掺钪富硅氧化硅中的 $\text{Er}^{3+}$ 激发示意图 (a) 低温下热处理显示较多的富硅相关的发光中心(小叉)和 $\text{Er}^{3+}$ (小圆圈);(b) 能带图;(c) 中等热处理温度下发光中心密度降低;(d) 显示高温热处理下析出硅纳米晶(深色大圆圈);(e) 对应的能带图,标出了硅纳米晶的有量子限制的禁带,对敏化 $\text{Er}^{3+}$ 有较弱作用[68]

Fig. 4. Schematic representation of the  $\text{Er}^{3+}$  excitation processes in Er-doped Si-rich  $\text{SiO}_2$  samples: (a) at low annealing temperatures, showing a high concentration of excess-Si related LCs indicated by crosses, as well as  $\text{Er}^{3+}$  ions, indicated by open circles; (b) the corresponding schematic band diagram, indicating the  $\text{SiO}_2$  valence band and conduction band, LC-related electronic levels in the band gap indicated by the horizontal lines, as well as the  $\text{Er}^{3+}$  energy levels (LC-mediated excitation is indicated by the vertical arrows); (c) at intermediate annealing temperatures, showing a reduced concentration of LCs; (d) at high annealing temperatures, showing the formation of Si nanocrystals (dark circles); (e) the corresponding band diagram, indicating the presence of Si nanocrystals with a quantum confined band gap. A weak exciton-mediated contribution to the Er excitation is indicated by the light vertical arrow [68].

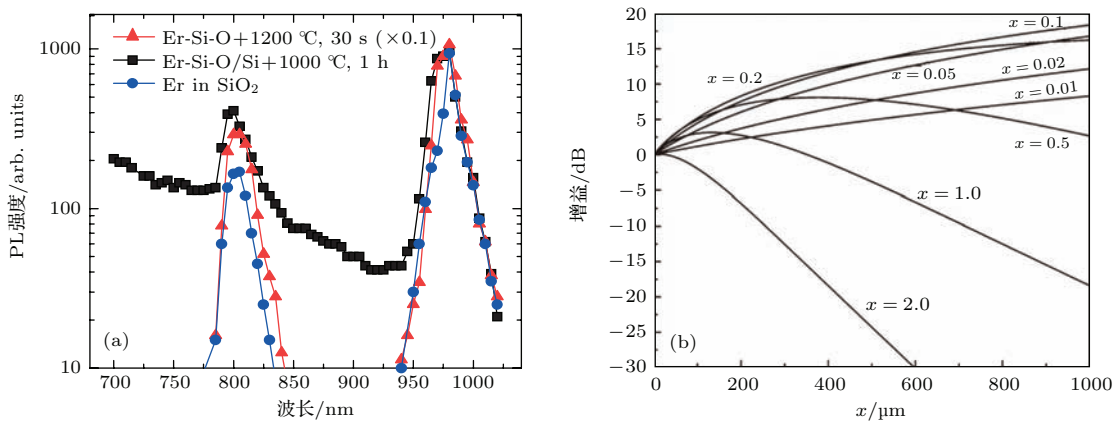


图5 (a) 三种材料的光致激发谱[73];(b) Er/Y比不同的硅酸盐化合物不同波导长度下的光增益[76]

Fig. 5. (a) PLE spectra for the three materials [73]; (b) optical gain as a function of waveguide length for different  $\text{Er}^{3+}$  concentration [76].

达 540  $\mu\text{s}$ , 比文献 [79] 中报道的数十微秒高一个数量级, 这将可能在较低的抽运光功率下就实现较高增益, 2014 年他们报道了这种纳米线的增益达到了 30 dB [80]. 尽管这种单晶纳米线带来的结果令人振奋, 但是这种纳米尺度的粒径导致它的尺寸难以精确控制, 以及如何与光纤的耦合等都是需要考虑的问题.

### 2.3 硅中缺陷发光

等电子缺陷中心是利用缺陷活性中心发光的典型实例. 在硅中掺入与硅同族 (IV 族) 的元素, 从而形成一个较为复杂的杂质——缺陷组合体, 该组合体由于分子极性可以俘获一个载流子, 然后形成带电中心; 该中心可以俘获电性相反的载流子, 形成束缚激子, 而正是这种束缚激子提高了间接带隙材料的发光能力. 由于通常只能在极低温情况下获得很低的发光效率, 故而近年来利用等电子中心提高硅基材料发光能力的方法研究较少. 2013 年, 日本的 Michio 等 [81] 在掺氮的 CZ 硅中注入  $\text{Al}^+$ , 然后 N 通过与 Al 形成 Al-N 等电子陷阱, 从而发射出 1.223 eV 的近红外辐射, 并发现 N 浓度介于  $4 \times 10^{13}$  和  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时随 N 浓度增加辐射强度也增加.

自从 Drozdov 在 20 世纪 70 年代发现硅中的位错可以在极低温下辐射出由 D1 到 D4 峰的四个光致荧光特征峰组成的近红外光以来, 硅中的位错发光也一度受到广泛关注. 主要由于位错发光波段处于红外, 特别是其 D1 峰位于 1.5  $\mu\text{m}$ , 对应石英光纤最低损耗窗口 [82–86]. 目前, 向硅中引入位错方法多样, 主要有塑性变形、氧沉淀引入、离子注入、硅片键合、硅锗错配和激光照射. 浙江大学杨德仁课题组 [87–89] 则创造性地采用电子束辐照方法, 成功在硅中诱生位错, 详细地研究了这种位错的生成性能及物理结构, 获得了室温下 D1 的光致发光和电致发光. 同时设计实验对硅中位错特征光谱信号的物理机理进行了探讨, 推动了硅中缺陷发光研究.

更加令人振奋的是在 2011 年, Ohtsu 课题组提出 Dressed 光子-声子辅助激发载流子的概念, 成功制备了硅基 PN 结发光器件, 器件的外量子效率高达 15%, 功率转换效率为 1.3% [90].

### 2.4 硅基锗材料

Ge 和 Si 同属 IV 族半导体, 禁带宽度比 Si 小,

对应于通信波长, 吸收系数大, 迁移率高, 而且和目前硅基集成的 CMOS 工艺良好兼容, 所以一直以来人们没有放弃利用 Ge 来制备高效硅基光源. 尽管 Ge 也是间接带隙半导体, 但是其直接带隙与间接带隙的能谷差只有 140 meV ( $E_L = 0.66 \text{ eV}$ ), Ge 的  $\Gamma$  能谷中仍有少量电子占据, 并且这部分电子具有极高的辐射复合概率. 近年来, 研究者提出通过能带工程可以有效增加  $\Gamma$  能谷中的电子, 这就使变间接带隙为直接带隙成为可能.

2007 年, Liu 等 [91] 在硅上外延锗薄膜, 由于退火后热失配产生了张应变, 可以降低  $\Gamma$  和  $L$  能谷之间的差值, 0.25% 的张应变如图 6 (b) 所示; 当应用张应变配合 n 型掺杂时, 可以进一步增加使  $\Gamma$  能谷电子的填充概率, 0.25% 的张应变结合  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的 n 掺杂如图 6 (c) 所示, 从而大大提高直接带隙发光并可能获得增益. 另外, 从理论上计算得出当受到的张应变为 2% 时, 锗就变为直接带隙材料, 带隙

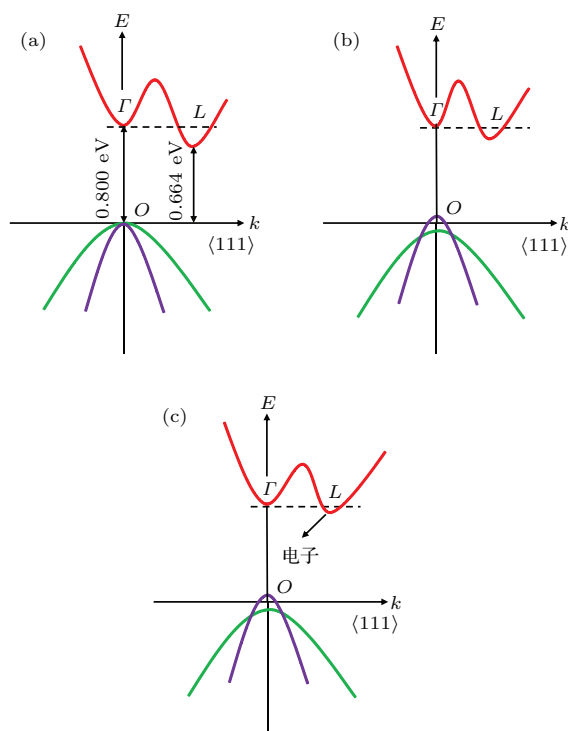


图 6 锗的各种带隙结构 (a) 体型 Ge 材料, 直接带隙和间接带隙差 136 meV; (b) 通过 0.25% 张应变的 Ge 材料进一步降低了差值; (c) 0.25% 张应变加 n 型掺杂的 Ge 材料的 L 能谷填满电子 [91]

Fig. 6. Schematic band structure of (a) bulk Ge, showing a 136 meV difference between the direct gap and the indirect gap; (b) the difference between the direct and the indirect gaps can be decreased by tensile strain; (c) the rest of the difference between direct and indirect gaps in tensile strained Ge can be compensated by filling electrons into the L valleys. [91].

为0.5 eV [92]. 但是实验上想要获得如此高的张应变比较困难, 而且如此大的张应变也会使晶体质量无法保证, 难以获得比较低的外延位错密度; 而且张应变很大时, 发光峰位也移至2300 nm作用, 不再满足光通信低损耗波段的要求. 正因为单靠张应变很难使锗变为直接带隙材料, 故而人们又引入n型掺杂, 发现0.25%的张应变和 $7.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的n型重掺可以得到准直接带隙的Ge [91], 比没有n型掺杂的样品效率提高14倍 [93].

为了利用Ge材料优良的光电性质, 除了设法在Si上外延锗之外, 人们还希望通过Ge与IV族其他元素合金化来得到直接带隙材料, 如GeSn, SiGeSn [94,95] 和SiGeC等. 这类材料大多也是间接带隙材料, 但它们存在合金散射的作用, 这一过程可以在价带导带间跃迁时保存动量, 这一过程比声子辅助过程稍强点, 但仍然很弱 [96]. 某些特定元素比例的IV族合金可以得到直接带隙材料, 如 $\text{Sn}_{0.15}\text{Ge}_{0.85}$ , 直接带隙能量为0.346 eV, 比间接带隙材料的0.441 eV还低 [97], 但是对应的辐射波长已经移至 $3.5 \mu\text{m}$ , 如果应用于通信波段, 需要通过其他手段对波长进行调节. 此外, 由于Sn在Ge中固溶度很小并且容易在表面偏析, 所以生长GeSn合金需要在低温进行, 增加了器件的制备难度 [96].

### 2.5 半导体硅化物

20世纪90年代末期, 一些硅化物材料也被证实是半导体, 如 $\beta\text{-FeSi}_2$ ,  $\text{CrSi}_2$  和  $\text{MnSi}_2$  等 [98,99]. 其中,  $\beta\text{-FeSi}_2$  一度也被认为是有前景的硅基光源. 1997年, Leong等 [100] 在《Nature》上报道了基于 $\beta\text{-FeSi}_2$  的发光二极管(LED).  $\beta\text{-FeSi}_2$  辐射波长在 $1.5 \mu\text{m}$ 左右, 所以曾一度受到广泛关注, 但是, 在室温下的载流子迁移率很低且不平衡, 所以调制速度将会很慢, 限制了其应用.

## 3 硅基LED

获得硅基发光材料, 只是完成了硅基光电集成中光源需求的第一步. 有了稳定、高效发光的材料, 并对其发光理论和制备工艺有了一定的掌握后, 更为关键的是需要设计和制备出能用来在硅片上实现大规模集成, 且制备过程与CMOS工艺兼容、发光效率高且强度大、工作方式是电抽运且功耗较低容易实现激光的器件. 硅基发光二极管比硅基激

光器要容易实现. 下面先详细介绍几种硅基LED器件.

### 3.1 硅p-n结二极管

尽管由于硅是间接带隙材料而一直认为不适合用作光源材料, 但是澳大利亚Green研究小组 [101] 发现如果对高纯单晶硅进行有效的改性也可以获得较高的发光效率. 他们以区熔法生长的高质量单晶硅为基底, 利用蚀刻技术把硅表面加工成一种周期性的锯齿状光学图形, 要求能使入射角小于全反射角, 这样几乎所有辐射复合产生的光都可以输出, 器件结构如图7(a)所示. 此外, 还对器件进行了高质量的热氧化和表面钝化, 这样可以有效地减少载流子的非辐射复合速率, 从而明显地提高发光效率.

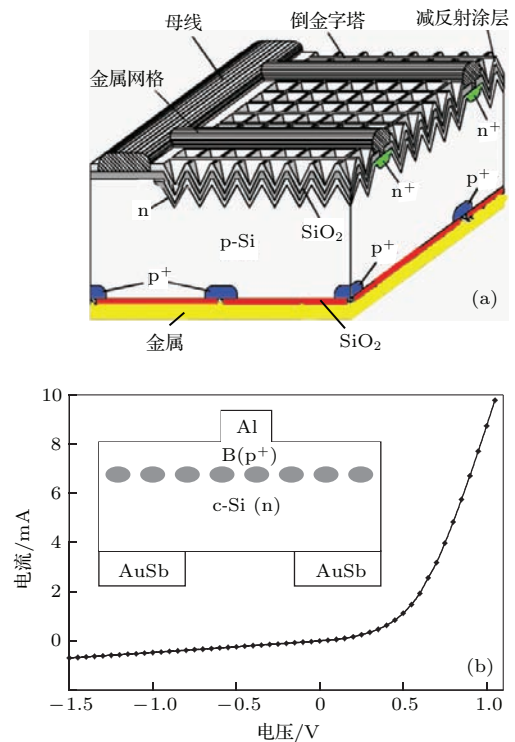


图7 (a) 高效的体硅LED示意图; (b) 室温下器件的I-V曲线, 插图是器件结构示意图

Fig. 7. (a) Schematic of high-efficiency silicon light-emitting diode; (b) the current-voltage plot for the device measured at room temperature, inset is a schematic of the LED device.

直接运用体硅来制备p-n结LED的另一种思路是利用硅中的缺陷发光, 最具代表性的工作是2001年Ng等 [86] 在《Nature》上发表的通过高剂量的硼离子注入n型单晶硅内形成了位错环, 位错环改变了Si的能带结构, 且对载流子具有二维量子



限制作用, 从而在室温下也观测到了较强的电致发光. 器件简单示意图见图 7 (b) 中的插图, 开启电压也较小. 这种引入位错环来限制载流子是为了阻挡载流子扩散发生非辐射复合, 制备方法比通过表面织构化来增强发光要简单, 正偏压下器件的外量子效率达到了 0.2%, 且响应时间也得到提高, 为 18  $\mu\text{s}$  左右<sup>[85]</sup>. 值得关注的是, 该器件并没有出现常见的温度猝灭现象, 甚至温度升高效率也有少量提高, 对此他们研究发现由于位错环的存在抑制了载流子扩散, 从而非辐射复合也就不随温度升高而增强, 且辐射复合速率几乎与温度无关, 这就消除了温度猝灭现象<sup>[102]</sup>.

上面这两种都是 21 世纪初的成果, 经过 10 余年的飞速发展有关硅 p-n 结 LED 又有了一些新的

突破. 东京大学的 Ohtsu Motoichi 课题组<sup>[90]</sup> 在 2011 年提出 dressed 光子 (DPs) 概念, 并利用这种 dressed 光子-声子辅助激发成功实现了 Si 发近红外光、红光、绿光和蓝光<sup>[103-105]</sup>. DPs 指的是在向纳米粒子照射光线时, 光子和纳米粒子的电子发生耦合, 就像“衣服”一样附着在纳米粒子表面的光子, 与 DPs 耦合后的电子会形成离散的声子能级, 这些能级为导带电子向价带跃迁提供了一个桥梁, 如图 8 中 (d) 所示. 制备 DPs 辅助激发的 LED 也较简单, 器件结构如图 8 (a), 在形成 p-n 结时, 向掺杂 B 的 p 层通以电流, 利用焦耳热来退火, 同时施以光照, 受到照射的 B 纳米粒子形成 DPs, 耦合后形成声子能级并发生受激辐射现象, 这就是发射的光与选用的照射光波长几乎一致的原因.

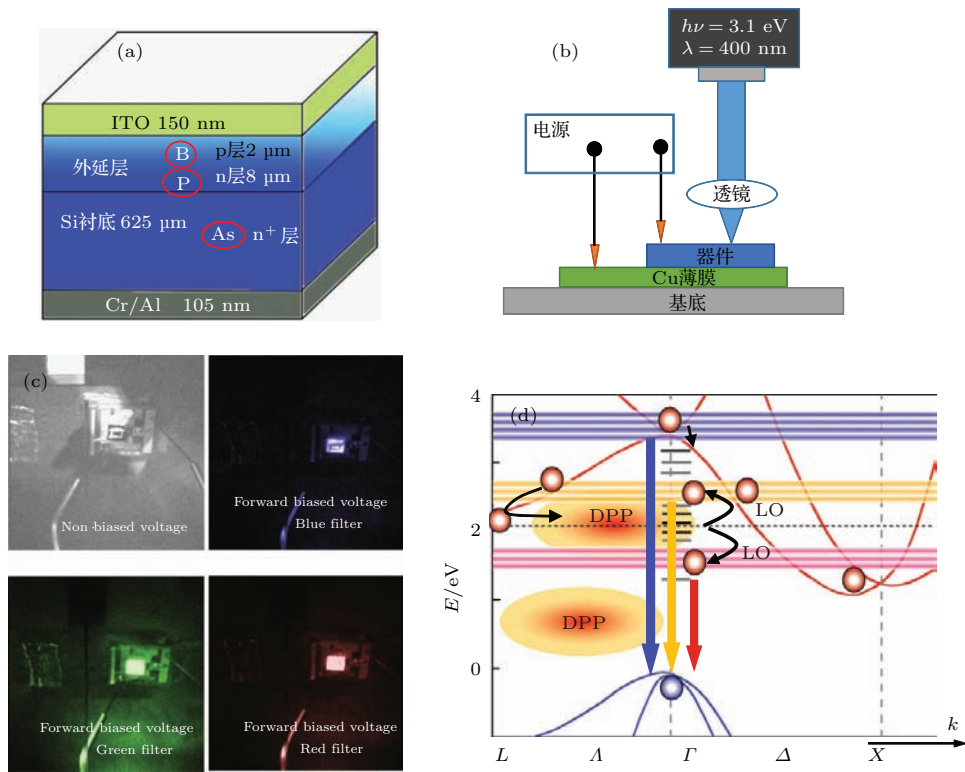


图 8 (a) 硅 p-n 结 LED 器件结构示意图; (b) 器件的 DPs 辅助热退火过程, 通以电流并加光照; (c) 发出蓝绿红不同颜色的 LED; (d) Si 能辐射出可见光的能带结构图, 蓝橙红三种水平实线对应于 3.1, 2.1 和 2 eV 三种光的 DPs 形成的声子能级<sup>[106]</sup>  
 Fig. 8. (a) Structure scheme of Si LED with a p-n homojunction; (b) experimental setup for dressed-photon-assisted annealing process; (c) photographs of device emitting light at room temperature, captured with a CCD camera; (d) schematic diagram of light emission in visible region from Si. Red and blue curves represent the energy levels of the conduction and valence bands. Blue, orange, and gray thick horizontal lines represent the phonon levels corresponding to 3.1, 2.1, and 2.0 eV, respectively<sup>[106]</sup>.

### 3.2 纳米硅 LED

早在 1995 年, Canham 课题组<sup>[107]</sup> 就制备出开启电压低于 3.5 V 的基于多孔硅的器件; 接着 1996

年, Hirschman 等<sup>[108]</sup> 报道了与双极性晶体管集成、可寻址的多孔硅发光器件, 实现了全硅基光电集成的原型, 这在当时引起轰动. 但是多孔硅发光稳定性和机械性能较差, 难与 CMOS 工艺兼容. 所以人们将目光投向同样具备量子限制效应的纳

米硅LED. 目前, 独立的硅纳米晶选择能带匹配的有机层制备的LED器件, 达到了8.6%的外量子效率<sup>[109]</sup>, 另外通过控制Si NC的尺寸可以得到发光波长可调的LED<sup>[110]</sup>. 但这些尺度很小的纳米晶制备较为困难, 且制备的器件工艺与CMOS兼容较差. 与独立的硅纳米晶相比, 富硅薄膜中得到的Si NC发光研究更为广泛<sup>[111-113]</sup>. 这类富硅薄膜材料的发光特性和硅纳米晶的浓度、尺寸及退火温度关系密切, 而控制这些变量的工艺也较为复杂, 此外纳米硅发光峰位一般小于900 nm, 在通信窗口之外, 因此在硅基光电集成中应用有限.

### 3.3 硅系薄膜LED

富硅薄膜中一般存在较多缺陷, 一些具有光学活性的缺陷可以作为发光中心参与发光. 氧化硅中缺陷发光研究较早, 在可见光波段主要是非桥氧空穴中心(non-bridging oxygen hole center, NBOHC)<sup>[114]</sup>和双键硅(two-coordinated silicon, (=Si—O)<sub>2</sub>Si: )<sup>[115]</sup>. 研究人员发现氧化硅中的缺陷浓度和硅的含量直接相关, 因此Kim等<sup>[116]</sup>通过调剂氧化硅薄膜中离子注入硅的剂量来调节薄膜中不同缺陷态浓度, 从而实现了发光峰位的调节. 但是制备的LED效率仍很低, 2013年Juvvert等<sup>[117]</sup>制备的MOS型发光器件功率效率仅为 $(2.6 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ .

在对氮化硅薄膜研究时发现缺陷主要有两类, 即带尾态和禁带中间态(K中心). 导带带尾态由Si—Si反键态或Si—N反键态构成, 价带带尾态则由Si—Si成键态和=N<sup>-</sup>中心组成; 禁带中间态则由硅的悬挂键组成<sup>[118]</sup>. Kinster等<sup>[119]</sup>通过调节氮化硅薄膜中Si/N比实现光致发光从可见到近红外波段的调节. 基于氮化硅的LED也早已制备成功<sup>[120-122]</sup>, 但是有关电致发光的来源仍未解决, 且电致发光峰位较难调节, 另外发光效率也不够高. 杨德仁课题组<sup>[123]</sup>通过对氮化硅薄膜器件电致发光峰位以及不同注入电流/电压下器件的载流子输运机理变化的详细研究, 发现其中较短波长的发光峰是由局域于K中心的电子和位于=N<sup>-</sup>带尾态的空穴复合产生的, 而较长波长的峰则是由位于导带带尾态的电子和局域在≡Si<sup>0</sup>中心的空穴之间复合产生. 此外, 还提出了薄膜中激子与局域表面等离子体(LSPs, 采用Ag纳米颗粒)之间耦合模型<sup>[124]</sup>, 并通过优化银纳米颗粒的尺寸实

现了氮化硅薄膜器件发光效率近一个数量级的提升<sup>[125-128]</sup>. 器件发光波长的调制也通过调节Ag纳米颗粒尺寸和注入电流/电压得以实现<sup>[123,129]</sup>. 值得一提的是2011年, Monroy等<sup>[130]</sup>在氮化硅薄膜体系中用飞秒激光器抽运实现了52 cm<sup>-1</sup>的光增益, 但是和纳米硅发光同样存在发光波段位于1320和1550 nm的两个通信窗口之外的问题.

### 3.4 硅基掺铒和铒硅酸盐化合物LED

前面已经说过, Er是有效的发光中心, 且1.54 μm发光波段对应于光通信波段, 但是常用的掺铒基体, 包括氧化硅<sup>[131,132]</sup>、氮化硅<sup>[64,133]</sup>、氮氧化硅<sup>[65]</sup>和碳化硅等, 禁带宽度都很大, 载流子难以有效注入, 所以制备的器件多是单极型. 这种单极型器件中, Er<sup>3+</sup>和纳米硅的激发都是通过热载流子碰撞离化, 这种方式下纳米硅的敏化效果并不好, 也就限制了硅基掺铒器件的发展. 2010年, Yerci等<sup>[134]</sup>利用掺铒富硅氮化硅薄膜制备了开启电压小于5 V的MOS型LED, 他们认为器件是双极型的, 载流子是通过P-F发射模型注入有源层并被带尾态俘获, 这些俘获的载流子复合后将能量传递给Er<sup>3+</sup>敏化其发光, 这一注入方式极大地降低了器件的开启电压; 但是Cueff等<sup>[135]</sup>进一步研究发现, 尽管氮化硅或富硅氮化硅基体由于缺陷辅助增强了导电能力, 如图9(a)所示, 但是外量子效率比SiO<sub>2</sub>基体的2%下降了3—4个数量级, 如图9(b)所示.

硅酸铒的电致发光器件由于其介质本质注入电流较为困难, 直到2009年北京大學秦國剛研究組才第一次實現硅酸鈣的電致發光器件<sup>[138]</sup>. 他們在硅酸鈣兩側引入富硅氧化硅層(SRO), SRO中的纳米硅增强了载流子注入, 但开启电压仍高达19.5 V. 第二年, 他们制备了富硅硅酸铒(SRES)的器件, 开启电压大大降低, 图9(c)对比了掺铒富硅氧化硅(Er: SRO)、硅酸铒和SRES的电致发光谱, 器件结构如插图所示<sup>[136]</sup>. 2012年, 北京大學的Wang等<sup>[137]</sup>制备了硅酸铒铒(EYS)的LED, 图9(d)为其电致发光谱. 器件中的SiN<sub>x</sub>层对器件稳定工作很重要, 电压随测量时间有略微升高说明EYS层或SiN<sub>x</sub>层有电荷积累. 尽管实现了硅酸铒的电致发光, 但是效率仍较低, 工作电压也过大, 距离实用化还有很长的路要走.

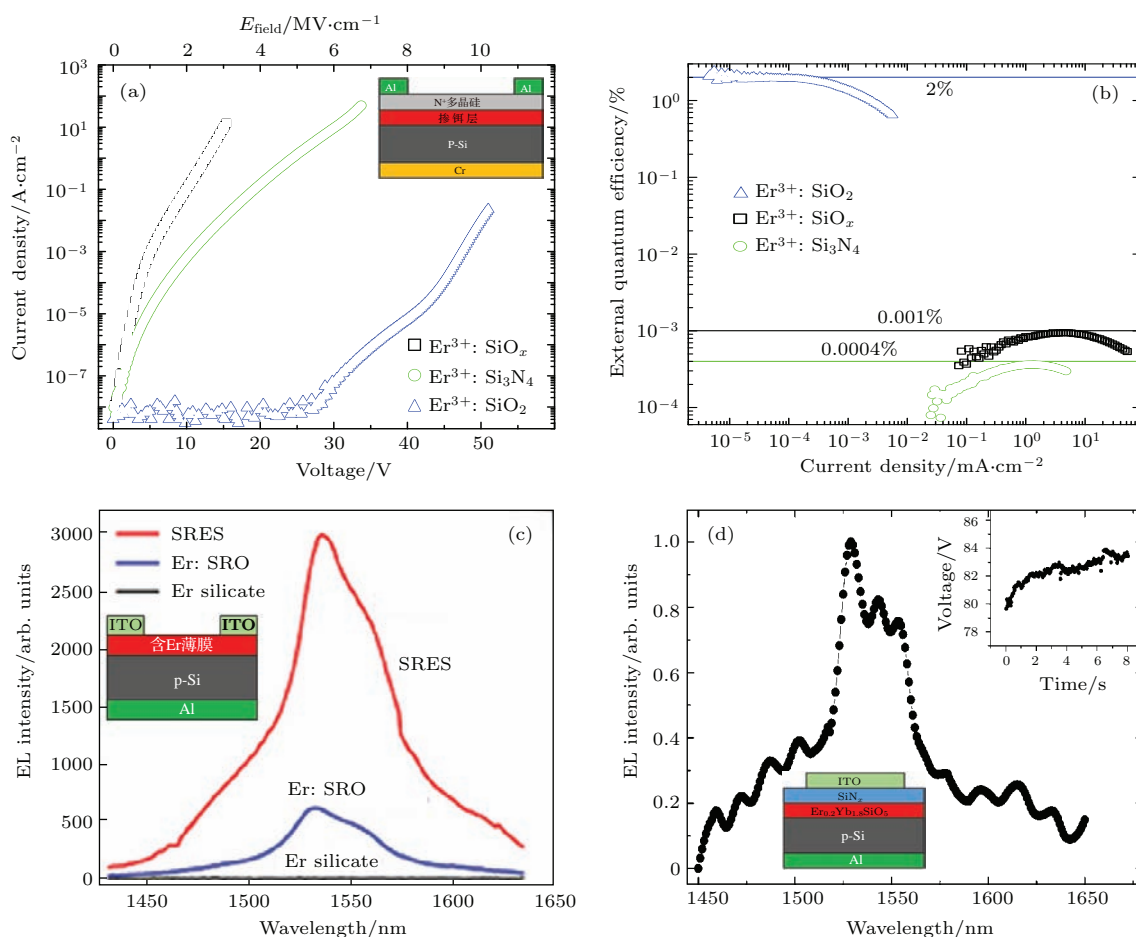


图9 (a) 不同基体材料掺铒的  $I$ - $V$  曲线, 插图为器件结构; (b) 为不同基体的外量子效率 [135]; (c) 三种不同材料的 EL, 插图为器件结构 [136]; (d) 硅酸铈 LED 的电致发光谱, 左插图为器件结构图, 右插图为电压随测量时间变化图 [137]

Fig. 9. (a) Current density as a function of the applied voltage for Er<sup>3+</sup>:SiO<sub>x</sub>, Er<sup>3+</sup>:Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, and Er<sup>3+</sup>:SiO<sub>2</sub>, inset is scheme of the device's geometry; (b) EQE for the near-infrared emission (1.3–1.6 μm) as a function of injected current for the three investigated light emitting devices [135]; (c) room temperature EL spectra at a forward-biased voltage of 10 V, inset is scheme of the device's geometry [136]; (d) the EL spectrum of the ErYb silicate MIS device under a constant current of 3 μA, the left inset shows a schematic cross section view of the ErYb silicate MIS device, the right shows the voltage variation versus the measurement time of the EL spectrum [137].

### 3.5 硅基锗 LED

近几年, 有关硅基 Ge 器件的研究取得了长足进展. 随着 Si 上外延高质量 Ge 薄膜的实现 [139], n 型重掺杂也成功实现 [93], 2009 年三个研究小组同时独立制备出 Ge 的发光二极管 [140–142]. 中国科学院半导体研究所成步文小组采用的 pin 结构, 加上 1.1–2.5 V 的正向偏压, 观测到了 1560 nm 左右的 Ge 直接带隙发光; 麻省理工学院的小组也采用了 pin 结构, 他们在 Ge 中引入 0.2%–0.25% 的张应变, 发射波长在 1600 nm 左右; 斯坦福大学的小组使用 n<sup>+</sup>p 结, 引入 0.2% 的张应变, 实现 1600 nm 左右波段发光. 近两年, 有关 Si 上 Ge 量子点和 GeSi/Ge 量子阱发光二极管也取得了一定进

展 [143,144], 这类器件可以观测到 Ge 材料的直接带隙发光, 但是对工艺要求很高, 晶体的质量有待进一步改善.

## 4 硅基激光器

硅基激光器是整个科学界和产业界孜孜不倦探索多年的一个前沿课题, 高效的硅基激光器决定着硅基光电集成能否实现, 因此硅基激光器的研制十分紧迫. 要想实现能够真正应用的硅基激光, 得满足激光器工作的 3 个条件: 1) 制备出具备光增益, 且易实现粒子数反转的硅基材料; 2) 能够有合适结构形式的光学谐振腔; 3) 能够在电抽运下实现受激辐射. 下面简单介绍几种硅基激光器的进展.

### 4.1 纳米结构硅激光器

自2000年Pavesi等<sup>[145]</sup>报道了镶嵌在二氧化硅中的纳米硅的光增益, 实验中采用Pump & Probe方法来测纳米硅的光增益, 测得净增益值约 $100\text{ cm}^{-1} \pm 10\text{ cm}^{-1}$ , 与直接带隙的半导体量子点处于同一量级. 之所以能获得增益, 和纳米硅的表面态密切相关. 接着, 在2005年, Cloutier等<sup>[146]</sup>在SOI的单晶硅上刻蚀了一种周期性的纳米孔阵列结构, 纳米孔的直径约110 nm, 结构如图10(b)和图10(c), 在514.5 nm的连续Ar离子激光抽运下得到了1.278  $\mu\text{m}$ 的连续光, 10 K下的光致发光谱如图10(a)所示. 研究发现, 能产生这种受激辐射的原因是周期性的阵列产生了高密度的A型缺陷中心, 这些缺陷作为光激活中心发生粒子数反转从而产生光增益, 但是只在很低温度下才能观测到这种受激辐射, 此外工作方式仍是光抽运. 故而室温下连续(CW)激光仍是挑战.

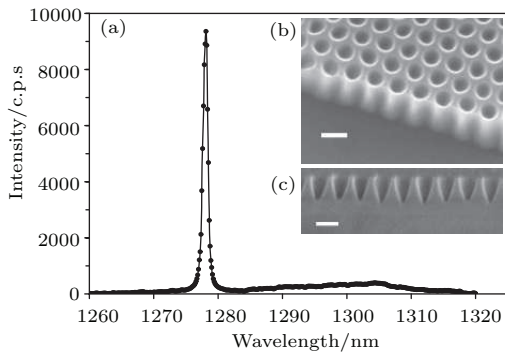


图10 (a) 514.5 nm 激发下的光致激发谱; (b) 纳米孔阵列的表面; (c) 截面 SEM 照片<sup>[146]</sup>  
 Fig. 10. (a) The emission spectrum from the nanopatterned SOI excited by 514.5 nm Ar laser; (b) the surface and; (c) cross-sectional view of the nanopatterned SOI observed under a scanning electron microscope<sup>[146]</sup>.

### 4.2 硅拉曼激光器

硅中受激拉曼散射(SRS)是一种非线性光学现象, 只有入射光强度超过一定的阈值才会出现较强的拉曼散射光, 即Si吸收了高能的光然后输出激光. 2005年, Intel公司的Rong等<sup>[19]</sup>报道了第一个波长可调的全硅拉曼激光器; 紧接着又通过改善器件结构实现了连续的拉曼激光输出<sup>[20]</sup>. 2007年, 他们又采用高Q值环形谐振腔并优化pin结构, 得到了25 V偏压下20 mW的低阈值和50 mW的高输出功率<sup>[147]</sup>, 器件的示意图和截面扫描电镜图

(SEM)分别见图11(a)和图11(b). 尽管关于Si拉曼激光器取得长足进展, 但是由于不能实现电抽运, 极大地限制了其进一步的应用.

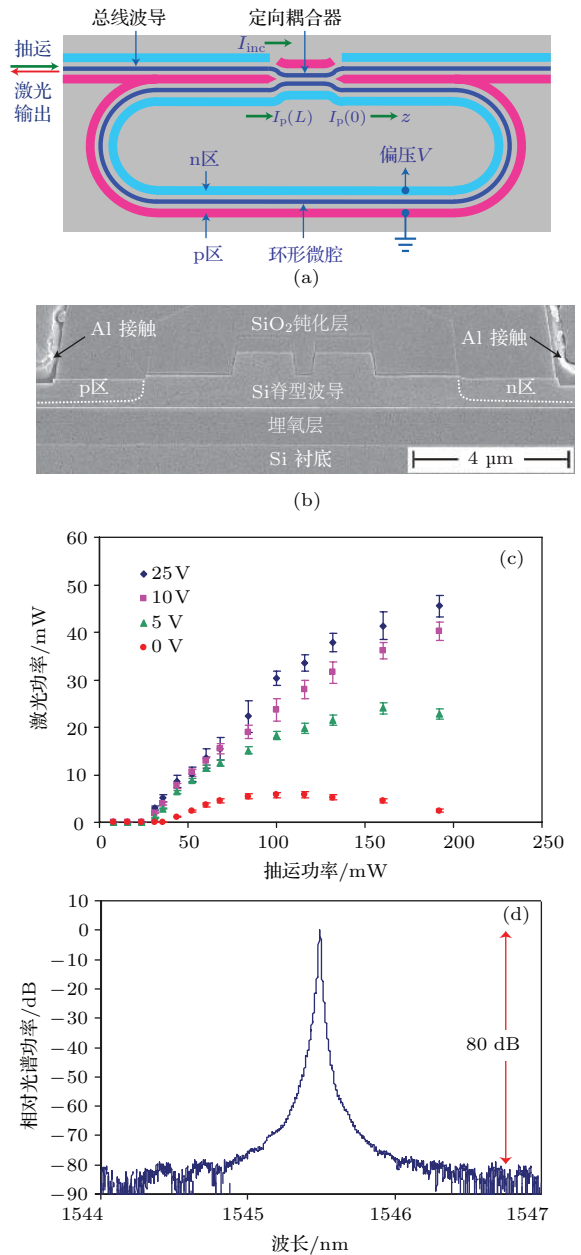


图11 低阈值硅环装拉曼激光器 (a) 硅pin结拉曼激光器示意图; (b) 器件的截面扫描电镜图片; (c) 激光输出功率和抽运功率不同偏压下关系; (d) 高分辨光谱显示单模抑制比高达80 dB<sup>[147]</sup>

Fig. 11. Low-threshold Si Raman racetrack ring laser: (a) Schematic of a device with a pin junction design; (b) SEM cross-section of a directional coupler and pin junction region; (c) laser output power against coupled input pump power, showing a higher output power achieved at a higher reverse bias on pin junction for a 3 cm cavity, the error bars here are derived from different measurement traces; (d) high-resolution spectrum showing a low threshold Si Raman racetrack ring laser with a side-mode suppression ratio of over 80 dB<sup>[147]</sup>.

### 4.3 锗硅激光器

2010年, 硅上外延Ge激光器终于取得突破, MIT的Kimerling小组<sup>[22]</sup>研制成功第一个室温下工作的光抽运的Ge激光器, 且发光波段位于通信窗口, 这一成果令人振奋. 他们基于的原理仍是结合张应变和n型重掺杂增加电子在直接带隙的填充概率, 进而增强直接带隙的发光效率, 实现激光. 他们在硅上选择性的外延一层锗波导, 见图12下插图, 热失配产生0.24%的张应变结合 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的n型掺杂, 得到直接带隙约0.76 eV的Ge. 从图12中可以看出阈值在6.0  $\mu\text{J}$ 左右, 值得说明的是发光效率随光注入增加和温度升高而增强, 这在硅上Ge发光二极管上也有发现<sup>[141]</sup>, 理论认为是由于焦耳热使 $\Gamma$ 能谷的费米-狄拉克分布重叠更大从而增强辐射复合概率. 两年后, 他们又率先成功实现了室温下的电抽运Ge激光器<sup>[21]</sup>.

前面说过, 除了在硅上外延Ge之外, 关于Ge与其他四族元素合金化也取得一定进展. 2015年, Wirths等<sup>[23]</sup>利用与CMOS兼容工艺的减压CVD方法在Si上制备出了GeSn的激光, 实验上发现Sn的浓度达到12.6%时, GeSn材料变为直接带隙, 如图13(a)中所示, 且并没有引入机械应力. 当用脉冲光抽运时, 升高抽运能量密度可以观察到明显的

输出阈值, 这是典型的激射行为<sup>[148]</sup>. 但是温度高于90 K时发光会猝灭, 见图13(b), 此外还有待实

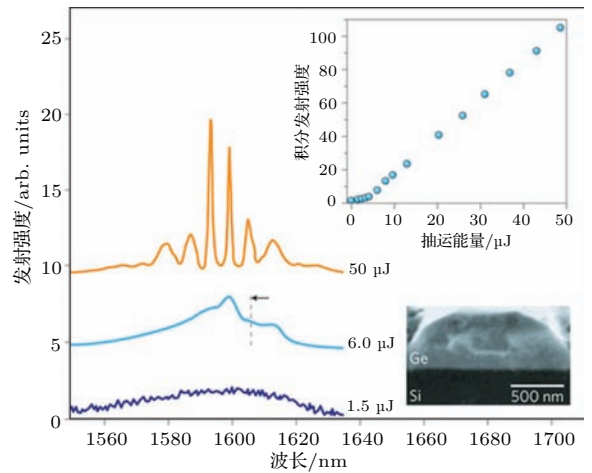


图12 光抽运的室温下连续硅上Ge激光器, 显示了不同抽运能量下的光致激光谱, 箭头指示了最大光增益波长; 上插图显示积分发射强度和抽运能量关系, 下插图显示Ge波导的SEM照片<sup>[22]</sup>

Fig. 12. Optically pumped Ge-on-Si laser demonstrating CW operation at room temperature. Edge-emission spectra of a Fabry-Pérot Ge waveguide under three different levels of optical pumping from a Q-switched laser at 1064 nm with a pulse duration of 1.5 ns and at a repetition rate of 1 kHz is shown. The arrow indicates the peak optical gain wavelength. Top inset: integral emission intensity from the waveguide facet versus optical pump power, showing the lasing threshold. Bottom inset: cross-sectional SEM image of the Ge waveguide<sup>[22]</sup>.

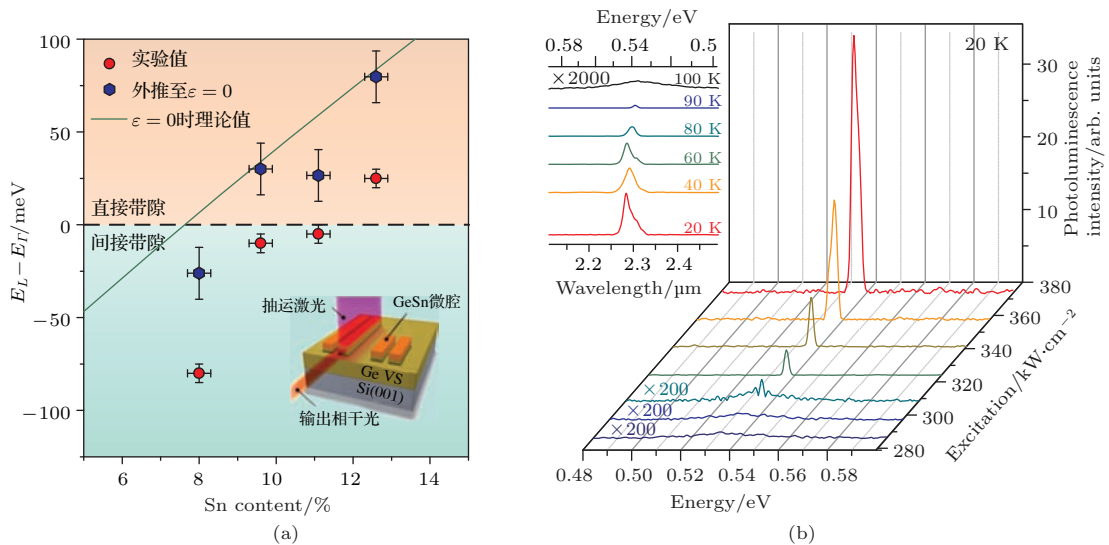


图13 (a) 间接带隙和直接带隙能量差( $E_L - E_G$ )随Sn浓度的变化, 插图为硅上GeSn激光的示意图; (b) 20 K下该激光(12.6% Sn)随抽运能量密度变化的PL光谱, 左侧小图为1000  $\text{kW}/\text{cm}^2$ 抽运能量密度下该激光随温度(20—100 K)变化的PL光谱<sup>[23]</sup>

Fig. 13. (a)  $E_L - E_G$  as a function of Sn concentration, the pump laser homogeneously excites the waveguide cavity, and the light emitted from one of the etched facets is demonstrated (inset); (b) power-dependent photoluminescence spectra of a 5- $\mu\text{m}$ -wide and 1-mm-long Fabry-Perot waveguide cavity fabricated from sample E ( $d_{\text{GeSn}} = 560 \text{ nm}$ , 12.6% Sn). Inset: temperature-dependent (20–100 K) photoluminescence spectra at 1000  $\text{kW}/\text{cm}^2$  excitation density<sup>[23]</sup>.

现电抽运。虽然作者得到的激光峰位在 $2.3\ \mu\text{m}$ ,并不直接对应低损耗窗口,但是这给硅基发光提供了另一平台。此外,这一波段激光还可以运用在气体探测和医疗诊断等方方面面。

#### 4.4 硅基 III-V 族混合集成激光器

前面介绍的几种 Si 基激光器尽管都取得了不少进展,基于 Ge 的电抽运激光也已经实现,但是它们由于各种条件限制,大多是光抽运,且阈值功率很大,这在硅基光电集成中难以实际应用。III-V 族化合物用作发光材料历史悠久,光电性能优秀,所以一种想法是采用外延或者键合等工艺将 III-V 族化合物和其他光电器件混合集成在硅片上<sup>[24,149-156]</sup>,作为目前的过渡。但是 III-V 族化合物与 Si 晶格常数失配较大,致使在硅上难以获得高质量的外延层。2005 年,密歇根大学的 Bhattacharya 研究组<sup>[157]</sup>获得了室温下直接生长在 Si 上的 InGaAs 量子点激光器;2006 年,Intel 和加州大学圣塔芭芭拉分校联合研制成功 AlGaInAs 和硅片键合的激光器<sup>[155]</sup>;2014 年,Chen 等<sup>[24,158]</sup>研制成功在高达 $111\ ^\circ\text{C}$ 下工作的硅片上 InAs/GaAs 量子点激光器。目前存在的问题是 Si 上外延 III-V 族化合物及键合工艺与 CMOS 工艺不兼容,且键合次品率较高,另外高温下 III-V 族元素会逐渐扩散至硅层,如何减轻这种扩散带来的影响仍需进一步研究。

## 5 总结与展望

虽然近些年来,硅基光源取得了巨大进展,但仍面临着很多挑战。首先,关于材料的理论设计虽然较为清楚,但是制备高质量的光源材料仍然复杂,如何简化工艺降低成本需要进一步研究;其次必须找到工艺简单、成本低廉、电抽运和低功耗的激光光源,容易实现单片集成的纳米硅、硅拉曼激光等面临着难以电抽运和发光效率低下的问题,而混合集成和外部光源耦合虽然发光效率高,但是工艺复杂且不兼容、集成度低且成本高昂。此外,在硅基掺铟体系中如何减轻自由载流子吸收提高增益也需要在能量传递机理和优化器件结构上下功夫;硅基 Ge 光源的 Ge 是由间接带隙变为直接带隙,发光特性还需深入了解,设计激光器时需考虑 Ge 的高折射率( $n = 4.3$ )给输出光耦合带来的困难。

综合来看,目前仍是 III-V 族化合物和硅混合集成激光器最接近实际应用,研究人员也在积极解决存在的一些问题;此外,硅基 Ge 光源也是能够取得较大突破的方向之一,近年也进展颇多;掺铟硅基和硅酸铟材料仍是重要的一个方向,另外基于表面等离子体激元和 dressed 光子器件也值得关注。

## 参考文献

- [1] Krishnamoorthy A V, Ho R, Zheng X, Schwetman H, Lexau J, Koka P, Li G, Shubin I, Cunningham J E 2009 *Proc. IEEE* **97** 1337
- [2] Arakawa Y, Nakamura T, Urino Y, Fujita T 2013 *IEEE Commun. Mag.* **51** 72
- [3] Soref R 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **12** 1678
- [4] Masini G, Colace L, Assanto G 2002 *Mater. Sci. Eng. B* **89** 2
- [5] Lim A E, Song J, Fang Q, Li C, Tu X, Duan N C K, Tern R P, Liow T 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **20** 1
- [6] Mashanovich G Z, Milošević M M, Nedeljkovic M, Owens N, Xiong B, Teo E J, Hu Y 2011 *Opt. Express* **19** 7112
- [7] Vlasov Y, Mcnab S 2004 *Opt. Express* **12** 1622
- [8] Lee K K, Lim D R, Kimerling L C, Shin J, Cerrina F 2001 *Opt. Lett.* **26** 1888
- [9] Pathak S, Yu H, van Thourhout D, Bogaerts W 2014 *11th IEEE International Conference on Group IV Photonics IEEE Paris, France, August 27-29, 2014* p237
- [10] Yao J, Sun Z, Zhong L, Natelson D, Tour J M 2010 *Nano Lett.* **10** 4105
- [11] Tanabe T, Notomi M, Mitsugi S, Shinya A, Kuramochi E 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 151112
- [12] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, Thomson D J 2010 *Nat. Photon.* **4** 518
- [13] Liao L, Liu A, Rubin D, Basak J, Chetrit Y, Nguyen H, Cohen R, Izhaky N, Paniccia M 2007 *Electron. Lett.* **43** 1196
- [14] Xu Q, Schmidt B, Pradhan S, Lipson M 2005 *Nature* **435** 325
- [15] Liu A, Jones R, Liao L, Samara-Rubio D, Rubin D, Cohen O, Nicolaescu R, Paniccia M 2004 *Nature* **427** 615
- [16] Oehme M, Werner J, Kasper E, Jutzi M, Berroth M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 71117
- [17] Yu Z, Aceves-Mijares M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 81101
- [18] Michel J, Liu J, Kimerling L C 2010 *Nat. Photon.* **4** 527
- [19] Rong H, Liu A, Jones R, Cohen O, Hak D, Nicolaescu R, Fang A, Paniccia M 2005 *Nature* **433** 292
- [20] Rong H, Jones R, Liu A, Cohen O, Hak D, Fang A, Paniccia M 2005 *Nature* **433** 725
- [21] Camacho-Aguilera R E, Cai Y, Patel N, Bessette J T, Romagnoli M, Kimerling L C, Michel J 2012 *Opt. Express* **20** 11316
- [22] Liu J, Sun X, Camacho-Aguilera R, Kimerling L C, Michel J 2010 *Opt. Lett.* **35** 679

- [23] Wirths S, Geiger R, von den Driesch N, Mussler G, Stolica T, Mantl S, Ikonic Z, Luysberg M, Chiussi S, Hartmann J M 2015 *Nat. Photon.* **9** 88
- [24] Chen S M, Tang M C, Wu J, Jiang Q, Dorogan V G, Benamara M, Mazur Y I, Salamo G J, Seeds A J, Liu H 2014 *Electron. Lett.* **50** 1467
- [25] Justice J, Bower C, Meitl M, Mooney M B, Gubbins M A, Corbett B 2012 *Nat. Photon.* **6** 610
- [26] Yang H, Zhao D, Chuwongin S, Seo J, Yang W, Shuai Y, Berggren J, Hammar M, Ma Z, Zhou W 2012 *Nat. Photon.* **6** 615
- [27] Liu H, Wang T, Jiang Q, Hogg R, Tutu F, Pozzi F, Seeds A 2011 *Nat. Photon.* **5** 416
- [28] Chen R, Tran T D, Ng K W, Ko W S, Chuang L C, Sedgwick F G, Chang-Hasnain C 2011 *Nat. Photon.* **5** 170
- [29] Canham L T 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1046
- [30] Jung K H, Shih S, Kwong D L 1993 *J. Electrochem. Soc.* **140** 3046
- [31] Cullis A G 1991 *Nature* **353** 335
- [32] Cullis A G, Canham L T, Calcott P D J 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 909
- [33] Buda F, Kohanoff J, Parrinello M 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 1272
- [34] Prokes S M 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 3244
- [35] Qin G G, Jia Y Q 1993 *Solid State Commun.* **86** 559
- [36] Pi X, Chen X, Yang D 2011 *J. Phys. Chem. C* **115** 9838
- [37] Chen X, Pi X, Yang D 2010 *J. Phys. Chem. C* **115** 661
- [38] Ma Y, Chen X, Pi X, Yang D 2012 *J. Nanopart. Res.* **14** 1
- [39] Chen X, Pi X, Yang D 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 193108
- [40] Wang R, Pi X, Yang D 2013 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15** 1815
- [41] Ma Y, Pi X, Yang D 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 5401
- [42] Ni Z, Pi X, Yang D 2012 *RSC Adv.* **2** 11227
- [43] Ma Y, Chen X, Pi X, Yang D 2011 *J. Phys. Chem. C* **115** 12822
- [44] Pi X, Chen X, Ma Y, Yang D 2011 *Nanoscale* **3** 4584
- [45] Pi X D, Wang R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 076102
- [46] Wang R, Pi X, Yang D 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 19434
- [47] Valenta J, Juhasz R, Linnros J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1070
- [48] Priolo F, Gregorkiewicz T, Galli M, Krauss T F 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 19
- [49] Wang Y Q, Smirani R, Ross G G 2004 *Nanotechnology* **15** 1554
- [50] Pei Z, Su A Y, Hwang H L, Hsiao H L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 63503
- [51] Kim T, Park N, Kim K, Sung G Y, Ok Y, Seong T, Choi C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5355
- [52] Kang Z T, Arnold B, Summers C J, Wagner B K 2006 *Nanotechnology* **17** 4477
- [53] Orii T, Hirasawa M, Seto T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3395
- [54] Zacharias M, Heitmann J, Scholz R, Kahler U, Schmidt M, Blasing J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 661
- [55] Rui Y, Li S, Xu J, Song C, Jiang X, Li W, Chen K, Wang Q, Zuo Y 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 64322
- [56] Lin G, Pai Y, Lin C, Chen C 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 263514
- [57] Ennen H, Pomrenke G, Axmann A, Eisele K, Haydl W, Schneider J 1985 *Appl. Phys. Lett.* **46** 381
- [58] Ennen H 1983 *Appl. Phys. Lett.* **43** 943
- [59] Adeola G W, Rinnert H, Miska P, Vergnat M 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 53515
- [60] Taguchi A, Takahei K 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 2800
- [61] Priolo F, Franzò G, Pacifici D, Vinciguerra V, Iacona F, Irrera A 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 264
- [62] Kenyon A J, Trwoga P F, Federighi M, Pitt C W 1994 *J. Phys.: Condens. Matter* **6** L319
- [63] Jambois O, Gourbilleau F, Kenyon A J, Montserrat J, Rizk R, Garrido B 2010 *Opt. Express* **18** 2230
- [64] Ramírez J M, Cueff S, Berencén Y, Labbé C, Garrido B 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 83103
- [65] Xu L, Jin L, Li D, Yang D 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 71101
- [66] Garrido B, García C, Seo S Y, Pellegrino P, Navarro-Urrios D, Daldosso N, Pavesi L, Gourbilleau F, Rizk R 2007 *Phys. Rev. B* **76**
- [67] de Dood M J A, Knoester J, Tip A, Polman A 2005 *Phys. Rev. B* **71** 115102
- [68] Savchyn O, Ruhge F R, Kik P G, Todi R M, Coffey K R, Nukala H, Heinrich H 2007 *Phys. Rev. B* **76** 195419
- [69] Kanjilal A, Rebohle L, Voelskow M, Skorupa W, Helm M 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 103522
- [70] Jin L, Li D, Xiang L, Wang F, Yang D, Que D 2013 *Nanoscale Res. Lett.* **8** 366
- [71] Yerci S, Li R, Kucheyev S O, van Buuren T, Basu S N, Dal Negro L 2010 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **16** 114
- [72] Steveler E, Rinnert H, Devaux X, Dossot M, Vergnat M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 221902
- [73] Miritello M, Lo Savio R, Iacona F, Franzò G, Irrera A, Piro A M, Bongiorno C, Priolo F 2007 *Adv. Mater.* **19** 1582
- [74] Isshiki H, de Dood M J A, Polman A, Kimura T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4343
- [75] Wang X J, Wang B, Wang L, Guo R M, Isshiki H, Kimura T, Zhou Z 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 71903
- [76] Wang X J, Yuan G, Isshiki H, Kimura T, Zhou Z 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 13506
- [77] Wang L, Guo R, Wang B, Wang X, Zhou Z 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 900
- [78] Yin L, Ning H, Turkdogan S, Liu Z, Ning C 2012 *CLEO: Science and Innovations* California, United States, May 5–12, 2012 h3D-h4D
- [79] Lo Savio R, Miritello M, Piro A M, Priolo F, Iacona F 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 21919
- [80] Liu Z, Zhao G, Yin L, Ning C Z 2014 *CLEO: Science and Innovations* California, United States, May 4–9, 2014 M4H
- [81] Tajima M, Kamata Y 2013 *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 86602
- [82] Milosavljević M, Lourenço M A, Gwilliam R M, Home-wood K P 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 33508
- [83] Yu X, Song L, Yang D, Kittler M, Rozgonyi G A 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 211120

- [84] Kveder V, Badylevich M, Schrter W, Seibt M, Steinman E, Izotov A 2005 *Phys. Status Solidi A* **202** 901
- [85] Kveder V, Badylevich M, Steinman E, Izotov A, Seibt M, Schroter W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2106
- [86] Ng W L, Lourenco M A, Gwilliam R M, Ledain S, Shao G, Homewood K P 2001 *Nature* **410** 192
- [87] Xiang L, Li D, Jin L, Wang S, Yang D 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 33518
- [88] Xiang L, Li D, Jin L, Pivac B, Yang D 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 63528
- [89] Xiang L, Li D, Jin L, Yang D 2012 *Solid State Commun.* **152** 1956
- [90] Kawazoe T, Mueed M A, Ohtsu M 2011 *Appl. Phys. B* **104** 747
- [91] Liu J, Sun X, Pan D, Wang X, Kimerling L C, Koch T L, Michel J 2007 *Opt. Express* **15** 11272
- [92] Liu J, Cannon D D, Wada K, Ishikawa Y, Danielson D T, Jongthammanurak S, Michel J, Kimerling L C 2004 *Phys. Rev. B* **70** 155309
- [93] Sun X, Liu J, Kimerling L C, Michel J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 11911
- [94] Kouvetakis J, Kouvetakis J, Tolle J, Tolle J, Menendez J, Menendez J D, Costa V R D 2007 *4th IEEE International Conference on Group IV Photonics IEEE* Tokyo, Japan, September 19–21, 2007 p1
- [95] Soref R, Kouvetakis J, Tolle J, Menendez J, D Costa V 2007 *J. Mater. Res.* **22** 3281
- [96] Sturm J C 1998 *MRS Bull.* **23** 60
- [97] He G, Atwater H A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1937
- [98] Filonov A B, Migas D B, Shaposhnikov V L, Borisenko V E, Henrion W, Rebien M, Stauss P, Lange H, Behr G 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 4410
- [99] Lange H 1997 *Phys. Status Solidi B* **201** 3
- [100] Leong D, Harry M, Reeson K J, Homewood K P 1997 *Nature* **387** 686
- [101] Green M A, Zhao J, Wang A, Reece P J, Gal M 2001 *Nature* **412** 805
- [102] Lourenco M A, Milosavljevic M, Gwilliam R M, Homewood K P, Shao G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 201105
- [103] Yamaguchi M, Kawazoe T, Ohtsu M 2014 *Appl. Phys. A* **115** 119
- [104] Motoichi O 2012 *Nanophotonics* **1** 83
- [105] Wada N, Tran M A, Kawazoe T, Ohtsu M 2014 *Appl. Phys. A* **115** 113
- [106] Tran M A, Kawazoe T, Ohtsu M 2014 *Appl. Phys. A* **115** 105
- [107] Loni A, Simons A J, Cox T I, Calcott P, Canham L T 1995 *Electron. Lett.* **31** 1288
- [108] Hirschman K D, Tsybeskov L, Duttagupta S P, Fauchet P M 1996 *Nature* **384** 338
- [109] Cheng K, Anthony R, Kortshagen U R, Holmes R J 2011 *Nano Lett.* **11** 1952
- [110] Maier-Flaig F, Rinck J, Stephan M, Bocksrocker T, Bruns M, Kübel C, Powell A K, Ozin G A, Lemmer U 2013 *Nano Lett.* **13** 475
- [111] Anopchenko A, Marconi A, Wang M, Pucker G, Bellutti P, Pavesi L 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 181108
- [112] Berencn Y, Carreras J, Jambois O, Ramirez J M, Rodriguez J A, Domnguez C, Hunt C E, Garrido B 2011 *Opt. Express* **19** A234
- [113] Huh C, Kim K H, Kim B K, Kim W, Ko H, Choi C J, Sung G Y 2010 *Adv. Mater.* **22** 5058
- [114] Vaccaro L, Cannas M, Radzig V, Boscaino R 2008 *Phys. Rev. B* **78** 75421
- [115] Skuja L 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **239** 16
- [116] Kim H B, Kim T G, Son J H, Whang C N, Chae K H, Lee W S, Im S, Song J H 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 1851
- [117] Juvert J, Gonzalez Fernandez A A, Morales-Snchez A, Barreto J, Aceves M, Llobera A, Domnguez C 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 2913
- [118] Robertson J, Powell M J 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 415
- [119] Kistner J, Chen X, Weng Y, Strunk H P, Schubert M B, Werner J H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 23520
- [120] Huang R, Wang D Q, Ding H L, Wang X, Chen K J, Xu J, Guo Y Q, Song J, Ma Z Y 2010 *Opt. Express* **18** 1144
- [121] Cen Z H, Chen T P, Liu Z, Liu Y, Ding L, Yang M, Wong J I, Yu S F, Goh W P 2010 *Opt. Express* **18** 20439
- [122] Pei Z, Chang Y R, Hwang H L 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2839
- [123] Li D, Wang F, Yang D, Que D 2012 *Opt. Express* **20** 17359
- [124] Wang F, Li D, Yang D, Que D 2012 *Nanoscale Res. Lett.* **7** 669
- [125] Li D, Wang F, Yang D 2013 *Nanoscale* **5** 3435
- [126] Wang F, Li D, Yang D, Que D 2013 *Opt. Express* **21** 846
- [127] Wang F, Li D, Jin L, Ren C, Yang D, Que D 2013 *Opt. Lett.* **38** 2832
- [128] Wang F, Li D, Yang D, Que D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 31113
- [129] Wang F, Li D, Jin L, Ren C, Yang D, Que D 2013 *Opt. Express* **21** 1675
- [130] Monroy B M, Crgut O, Gallart M, Hnerlage B, Gilliot P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 261108
- [131] Ramírez J M, Ferrarese Lupi F, Jambois O, Berencén Y, Navarro-Urrios D, Anopchenko A, Marconi A, Prtljaga N, Tengattini A, Pavesi L, Colonna J P, Fedeli J M, Garrido B 2012 *Nanotechnology* **23** 125203
- [132] Irrera A, Iacona F, Franzò G, Miritello M, Lo Savio R, Castagna M E, Coffa S, Priolo F 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 54302
- [133] Rebohle L, Berencén Y, Wutzler R, Braun M, Hiller D, Ramírez J M, Garrido B, Helm M, Skorupa W 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 123104
- [134] Yerci S, Li R, Dal Negro L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 81109
- [135] Cueff S, Manel Ramiírez J, Kurvits J A, Berencén Y, Zia R, Garrido B, Rizk R, Labbé C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 191109
- [136] Yin Y, Xu W J, Wei F, Ran G Z, Qin G G, Shi Y F, Yao Q G, Yao S D 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 335102
- [137] Wang B, Guo R M, Wang X J, Wang L, Hong L Y, Yin B, Gao L F, Zhou Z 2012 *Opt. Mater.* **34** 1371
- [138] Yin Y, Sun K, Xu W J, Ran G Z, Qin G G, Wang S M, Wang C Q 2009 *J. Phys.: Condens. Matter* **21** 12204



- [139] Luan H, Lim D R, Lee K K, Chen K M, Sandland J G, Wada K, Kimerling L C 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2909
- [140] Sun X, Liu J, Kimerling L C, Michel J 2009 *Opt. Lett.* **34** 1198
- [141] Cheng S, Lu J, Shambat G, Yu H, Saraswat K, Vuckovic J, Nishi Y 2009 *Opt. Express* **17** 10019
- [142] Hu W, Cheng B, Xue C, Xue H, Su S, Bai A, Luo L, Yu Y, Wang Q 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 92102
- [143] Liu Z, Hu W, Li C, Li Y, Xue C, Li C, Zuo Y, Cheng B, Wang Q 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 231108
- [144] Liu Z, Hu W, Su S, Li C, Li C, Xue C, Li Y, Zuo Y, Cheng B, Wang Q 2012 *Opt. Express* **20** 22327
- [145] Pavesi L, Dal Negro L, Mazzoleni C, Franzo G, Priolo F 2000 *Nature* **408** 440
- [146] Cloutier S G, Kossyrev P A, Xu J 2005 *Nat. Mater.* **4** 887
- [147] Rong H, Xu S, Kuo Y, Sih V, Cohen O, Radaay O, Pan-  
niccia M 2007 *Nat. Photon.* **1** 232
- [148] Samuel I D, Namdas E B, Turnbull G A 2009 *Nat. Pho-  
ton.* **3** 546
- [149] Tanabe K, Watanabe K, Arakawa Y 2012 *Sci. Rep.* **2**  
349
- [150] Tanabe K, Guimard D, Bordel D, Iwamoto S, Arakawa  
Y 2010 *Opt. Express* **18** 10604
- [151] Liang D, Fiorentino M, Okumura T, Chang H, Spencer  
D T, Kuo Y, Fang A W, Dai D, Beausoleil R G, Bowers  
J E 2009 *Opt. Express* **17** 20355
- [152] Fang A W, Lively E, Kuo Y, Liang D, Bowers J E 2008  
*Opt. Express* **16** 4413
- [153] Liang D, Bowers J E 2008 *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**  
1560
- [154] van Campenhout J, Rojo Romeo P, Regreny P, Seassal  
C, van Thourhout D, Verstuyft S, Di Cioccio L, Fedeli  
J, Lagahe C, Baets R 2007 *Opt. Express* **15** 6744
- [155] Fang A W, Park H, Cohen O, Jones R, Paniccia M J,  
Bowers J E 2006 *Opt. Express* **14** 9203
- [156] Roelkens G, van Thourhout D, Baets R, Smit M 2006  
*Opt. Express* **14** 8154
- [157] Mi Z, Bhattacharya P, Yang J, Pipe K P 2005 *Electron.  
Lett.* **41** 742
- [158] Chen S M, Tang M C, Wu J, Jiang Q, Dorogan V G,  
Benamara M, Mazur Y I, Salamo G J, Seeds A J, Liu H  
2014 *Electron. Lett.* **50** 1467

SPECIAL ISSUE—Physics and devices of silicon photonics

# Research progress of silicon light source\*

Shen Hao Li Dong-Sheng<sup>†</sup> Yang De-Ren

(State Key Laboratory of Silicon Materials, Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University,  
Hangzhou 310027, China)

( Received 7 July 2015; revised manuscript received 14 August 2015 )

## Abstract

To meet the requirements for high speed, low cost, and more information capacity, silicon photonics has been booming in recent years. Silicon photonics covers a very wide field. For the silicon photonics, researchers have successfully achieved silicon-based optical waveguides, switches, modulators, and detectors. But the problem of silicon based light source has not been really resolved, which has become a primary bottleneck for further developing the silicon photonics. The momentum of a phonon is required to allow an electron to transit from the minimum of the conduction band to the maximum of the valence band in Si because of the indirect bandgap. This two-particle process with a low probability makes it difficult to achieve high-efficiency silicon-based light source by itself.

However, much effort has been made to characterize and understand the light-emission phenomena of silicon-based devices. Also, more attempts were made to enhance the emission efficiency of silicon. Practical silicon lasers are very important for silicon photonics and have been a long goal for semiconductor scientists. A number of important breakthroughs in the past decade have focused on silicon as a photonic platform thanks to the efforts of scientists.

In this review, we introduce the recent progress of silicon-based luminescence materials, silicon light emitting diodes and silicon lasers. In the first part of this paper, common types of silicon-based light emitting materials, including porous silicon, silicon nanocrystals, rare earth-doped silicon, silicon defect emission, germanium on silicon and semiconducting silicides are comprehensively reviewed. Among them, the quantum effects and surface effects of low-dimensional silicon can greatly enhance the light emission efficiency. The erbium atoms in silicon-based rare earth materials can produce the light emission at communication wavelength band independently of the host. The transition from the lowest excited state to the 4f ground state yields light at 1.54  $\mu\text{m}$ . Moreover the emission energy is independent of the temperature due to the inner atomic transition. Group IV materials grown on silicon such as Ge and GeSn alloy can change from indirect bandgap into direct bandgap by introducing mechanically strain and modifying the component. Strong enhancement of photoluminescence and net gain emerging from the direct transition are very significant for fabricating the devices.

In the second part, different light emitting diodes (LEDs) fabricated with above luminescent materials are introduced. The Si PN diodes were once popular at the earlier research stage. One approach was to modify the effective surface on high-purity single crystal silicon and the other idea was to use optically active defects in silicon. Ten years later, silicon LEDs in which the dressed-photon-phonons assisted method is used, made the Si PN diode rejuvenated. LEDs fabricated on nano-structured Si and silicon-based film were limited in the optoelectronic integration since the luminescence wavelength is not corresponding to the low-loss communication region. Although erbium-doped and Er silicate LEDs emit suitable light, their high turn-on voltage and low luminescence efficiency block the practical application. The researches of Ge-on-Si LED mainly focus on modifying the band structure by introducing strain and n-doping.

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB632102).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [mselds@zju.edu.cn](mailto:mselds@zju.edu.cn)

In the third part, firstly we summarize the basic rules of the silicon laser. Then, we review the most recent progress in the field. Nanometer Si with periodic array can only behave unambiguous laser action using optical pumping and at very low temperature. Low threshold silicon Raman lasers with racetrack ring resonator cavities can only stop on paper also due to the difficulty in electrical pumping. The Ge-on-Si lasers operating at room temperature by optical and electrical pumping were accomplished in the past 5 years. The GeSn laser that is CMOS-compatible also came into being this year. Although so far, lasing has been implemented only by using pulsed optical pumping and stopped working at 90 K, this first demonstration of lasing in a direct-gap group IV alloy grown on standard silicon substrates is potentially an important step on the way to a platform of fully integrated silicon-based photonics. Hybrid III-V-on-Si lasers are considered as one of the most practical means due to the excellent photoelectric properties and mature preparation technology.

Finally, current problems and future development direction in the silicon light source are also presented briefly.

**Keywords:** silicon-based luminescence materials, silicon light emitting diodes, silicon laser, optoelectronic integration

**PACS:** 42.82.-m, 42.70.-a, 85.60.Jb, 42.55.Px

**DOI:** [10.7498/aps.64.204208](https://doi.org/10.7498/aps.64.204208)