

阱内 δ 掺杂 GaSbBi 单量子阱红外发光效率的光致发光光谱研究

马楠¹, 窦程², 王嫚¹, 朱亮清², 陈熙仁², 刘锋^{1*}, 邵军^{2*}

(1. 上海师范大学 数理学院, 上海 200234;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 采用变激发功率红外光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱方法研究四个不同阱内 δ 掺杂面密度的 GaSb_{0.93}Bi_{0.07}/GaSb 单量子阱 (Single Quantum Well, SQW) 及其非掺杂 SQW 参考样品。通过分析 GaSbBi SQW 和 GaSb 势垒/衬底成分的 PL 强度演化, 发现阱内 δ 掺杂导致红外辐射效率显著降低, 相对下降幅度约为 33% - 75%。进一步分析结果表明, 发光效率下降来源于界面恶化引发的“电子损失”和阱内晶格质量下降导致的“光子损失”的共同作用。这一工作有望为稀 Bi 红外发光器件的性能优化提供帮助。

关键词: 红外光致发光; GaSbBi; 发光效率; 阱内 δ 掺杂

Infrared emission efficiency of δ - doped GaSbBi single quantum well by photoluminescence spectroscopy

MA Nan¹, DOU Cheng², WANG Man¹, ZHU Liang-Qing², CHEN Xi-Ren², LIU Feng^{1*}, SHAO Jun^{2*}

(1. Department of Physics, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In this work, excitation power-dependent infrared photoluminescence (PL) measurements were carried out on four GaSb_{0.93}Bi_{0.07}/GaSb single quantum well (SQW) samples with different in-well δ -doping density as well as the corresponding reference SQW samples without doping. PL integral-intensity evolutions of the GaSbBi SQW and the GaSb barrier/substrate show a significant decrease in the infrared emission efficiency caused by the in-well δ -doping. The doping-induced relative decrease rate is about 33% - 75%. Further analysis indicates that the reduction of the infrared emission efficiency is a co-consequence of the "electron loss" caused by the interfacial deterioration and the "photon loss" caused by the GaSbBi lattice quality deterioration. This work may be helpful in optimizing the performance of diluted Bi infrared light-emitting devices.

Key words: infrared photoluminescence, GaSbBi, emission efficiency, in-well δ -doping

引言

III-V-Bi 半导体作为一种新型的材料体系, 在红外发光和光电探测应用方面颇具潜力^[1-5]。国际上多个课题组已经报道了基于稀 Bi 半导体的红外 LED 和激光二极管^[6-8]。从能带角度, 等电位 Bi 的掺入在 III-V 材料的价带中形成共振能级, 与价带顶

形成带反交叉相互作用^[9-10], 从而推动价带顶的上升和禁带宽度的收缩^[11-15], 同时引发辐射波长的温度敏感性下降^[16]和自旋轨道分裂能增强^[17]。这为半导体能带工程、红外光电应用乃至自旋量子发展提供了新的机会。

其中 GaSbBi 因其较窄的禁带宽度, 被认为是实

收稿日期: 2021-05-24, 修回日期: 2021-10-21

Received date: 2021-05-24, Revised date: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11974368, 61675224)、上海市自然科学基金和科学仪器领域项目 (18ZR1446100, 20142201000)、中国科学院上海技术物理研究所创新项目 (CX-289)

Foundation items: Supported by NSFC (11974368, 61675224), STCSM (18ZR1446100, 20142201000) of China, SITP KIP (CX-289) of China
作者简介 (Biography): 马楠 (1994-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究领域为半导体光谱学. E-mail: 2246251552@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: fliu@shnu.edu.cn; jshao@mail.sitp.ac.cn

现 2~4 μm 高性能红外发光器件的重要材料^[18]。类似于 InGaAs/GaAs 单量子阱 (Single Quantum Well, SQW)^[19], 在 GaSbBi SQW 内进行 δ 掺杂, 形成由自由载流子和离子化掺杂物的静电场导致的近 δ 电势, 将载流子限制在二维掺杂薄层附近, 有望进一步延长发光波长^[18, 20-21]。尽管如此, GaSbBi SQW δ 掺杂面密度对发光效率的影响还有待研究, 最优的掺杂面密度还有待探寻。尤其是考虑到 GaSbBi SQW 中存在台阶状界面结构, 有可能导致发光波长偏移和非均匀展宽^[22]。光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱是研究半导体发光特性的经典手段^[23], 具有非破坏、高灵敏等优势。PL 基本过程是: 价带中的电子被泵浦至高能的导带, 弛豫至导带边再经过辐射复合或者非辐射复合回到价带。通过分析辐射复合过程所发出的光子能量分布, 便可揭示半导体的能带结构和光学特性等性质。

本工作利用激发功率依赖的 PL 光谱研究不同阱内 δ 掺杂面密度 GaSbBi/GaSb SQW 的红外发光特性, 发现 δ 掺杂显著降低 SQW 的发光效率, 其原因主要来自界面恶化引发的“电子损失”和阱内晶格质量下降导致的“光子损失”的共同作用, 导致有效的红外辐射光子大幅度损失。这一结果揭示了 δ 掺杂对发光效率影响的机制, 为 GaSbBi 基高性能红外辐射器件制造和性能优化提供参考。

1 实验细节

四个不同 δ 掺杂面密度的 GaSbBi/GaSb SQW 和四个对应非掺杂参考样品均由分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 制备于 GaSb 衬底上。所有 SQW 的 Bi 组分均约为 7.0%, 阱宽 8 nm。阱内 δ 掺杂步骤如下: 在 GaSbBi 量子阱生长到一半厚度时, 停顿不同的时间段并在此期间注入相同 Te 气氛^[18]。通过保持稳定 Te 蒸发流量和改变中断时间, 可以实现掺杂面密度的调控。 δ 掺杂面密度由霍尔测量校准, 见表 1。在关闭 Te 蒸发流量的前提下采用相同的步骤, 为每一个 δ 掺杂 GaSbBi 量子阱分别生长了参考样品, 以此准确有效地说明 δ 掺杂面密度所带来的影响。

本工作的掺杂面密度范围为 $(1.14\sim 4.56)\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$, 最大值为最小值的 4 倍。简单估算, 转换成等效的体浓度范围为 $1\times 10^{18}\sim 1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$, 在重掺杂范围内浓度变化为 1 个数量级。这与已有文献^[24-25]所报道的重掺杂 GaSb 浓度变化范围相当。更高的掺杂浓度难以保证晶格结构的稳定性, 将引入额

外的因素降低样品的光学质量; 而生长过程中过短的停顿时间将导致更低掺杂浓度样品的有效掺杂面密度存在很大的涨落误差, 不利于浓度的可靠掌控。

PL 光谱测试是在多可变条件宽波段红外调制 PL 光谱实验系统上完成的, 系统中的傅里叶变换红外 (Fourier Transform Infrared, FTIR) 光谱仪以快速扫描模式运行。具体测试细节见文献^[26-29]。采用 CaF_2 分束器和 InSb 探测器配置便可覆盖 GaSbBi SQW 的有效发光波段。光谱的分辨率设定为 16 cm^{-1} , 所用泵浦激光波长 532 nm, 其输出功率由激光功率控制器控制。变温 PL 光谱测试过程中, 功率设置为 100 mW。变激发功率 PL 光谱测试时, 样品置于光学杜瓦中由液氮制冷至 77 K。

表 1 δ 掺杂 GaSbBi SQW 的面密度

Table 1 Sheet densities of δ -doped GaSbBi SQW

组别	1	2	3	4
Te 掺杂面密度 ($\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$)	1.14	2.28	3.42	4.56

2 结果与分析

变温 PL 光谱如图 1 所示, 在能量高于 0.7 eV 区域中, 低能量的 PL 光谱峰在低温下很强而在高温下很弱, 其强度随温度的淬灭要比高能峰快得多, 这是因为低温下光生载流子主要被低能态俘获而高温下则被热离化至高能态中^[28]。更重要的是, 可以看到 PL 光谱的极小值也随温度显著变化, 由于稀 Bi 半导体的折射率对温度并不敏感^[30], 即该范围内的特征峰与等厚干涉无关。

图 2 显示了 100 mW 激发功率下不同掺杂面密

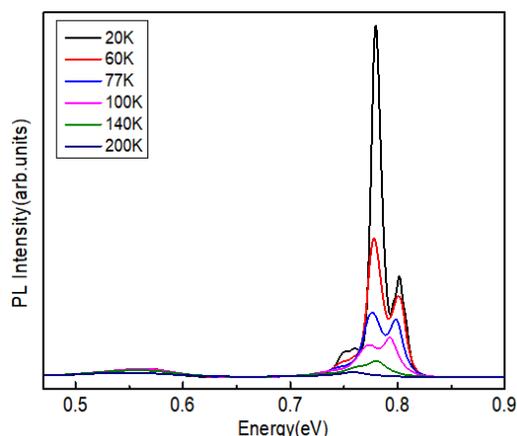


图 1 掺杂面密度为 $1.14\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ 的 SQW 变温 PL 光谱
Fig. 1 Variable temperature PL spectrum of GaSbBi SQW with a sheet density of $1.14\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$

度 SQW 和 GaSb 衬底的 PL 光谱。作为体材料的 GaSb 衬底在高于 0.7 eV 范围也表现出相似的 PL 光谱线型,说明 PL 线型来自 GaSb 本身而非干涉。而 SQW 样品的 PL 能量比衬底的略高,可能是由于 GaSbBi 晶格常数较大,对其邻近的 GaSb 产生一定的压应力^[31]。通过对比,具有掺杂的 SQW 的发光主要包含 SQW 和来自 GaSb 势垒/衬底这两部分^[18,32],前者能量低于 0.7 eV,表现为弱的近似单峰结构;后者能量高于 0.7 eV,表现为多个 PL 光谱特征峰,主要是由于 GaSb 的浅能级缺陷所导致。随着掺杂面密度的增加, SQW 的特征峰先出现红移;当面密度超过 $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,增大掺杂将使 PL 蓝移,可能是因为高掺杂导致的 Burstein-Moss 效应超过了 δ 电势效应^[33]。

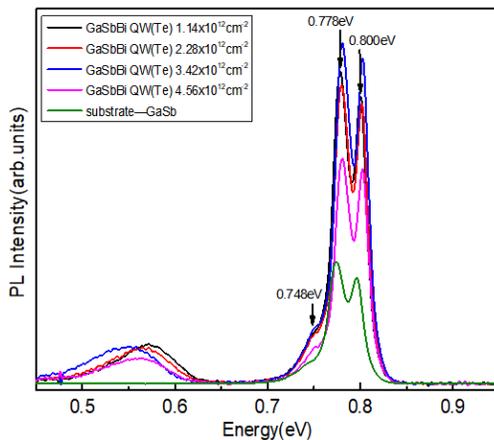


图2 不同掺杂面密度 GaSbBi SQW 样品和衬底的 100 mW 激发 PL 光谱

Fig. 2 100 mW PL spectra of GaSbBi SQW samples and Substrates with different sheet densities

其中在能量低于 0.7 eV 范围内,发光峰很宽,不同掺杂面密度的 GaSbBi SQW 及其相应参考样品在该范围内的 PL 半高宽列于表 2 中。以 GaSbBi 体材料的 Bi 致带隙收缩率约 30 meV/%Bi^[34]估算,四个 δ 掺杂 GaSbBi SQW 的 Bi 组分涨落分别为 $\pm 1.3\%$ 、 $\pm 1.4\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 和 $\pm 1.4\%$,所对应四个参考样品组分涨落分别为 $\pm 1.1\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 \pm

1.1% 和 $\pm 1.0\%$ 。从 Bi 组分涨落的相对差异来看,样品间的组分涨落差异很小。

图 3 代表性地显示了面密度 $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 SQW 及其参考样品的激发功率依赖 PL 光谱。显然,随着激发功率的增大, SQW 和 GaSb 势垒/衬底的 PL 强度都相应增强。为便于描述,我们将与 GaSbBi SQW 相关的 PL 波段标记为 I 区,而将与 GaSb 势垒/衬底相关的标记为 II 区。

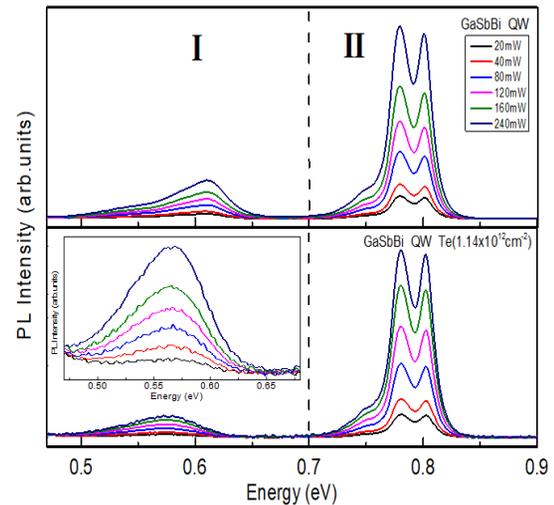


图3 掺杂面密度为 $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 GaSbBi SQW 和其参考样品的变激发功率 PL 谱。插图:为掺杂样品 I 区特征峰的放大

Fig. 3 Power-dependent PL spectra of GaSbBi SQW with a sheet density of $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ and the reference. Inset: Enlargement for the region I of the doped sample

为定量分析 δ 掺杂对 GaSbBi SQW 红外发光效率的影响,将 I 区 PL 强度进行积分,并与激发功率关联,结果如图 4 所示。可见,对于所有样品, I 区 PL 积分强度与激发功率成近线性关系。考虑到发光效率为辐射功率与激发功率的比值^[35],在线性关系前提下,积分强度-激发功率关系的斜率正比于材料的发光效率。因此通过线性拟合分析 δ 掺杂面密度导致斜率的相对变化,是有效途径,拟合所得斜率列于表 3。结果表明,对于不同掺杂面密度的 GaSbBi SQW,掺杂都导致了斜率降低,意味着发光

表 2 不同面密度 GaSbBi SQW 及其相应参考样品 I 区特征峰的半高宽

Table 2 FWHMs of zone I for the GaSbBi SQWs with different areal densities and the references as well

组别	1		2		3		4	
样品	GaSbBi QW Te	GaSbBi QW						
	$(1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$	
宽度(meV)	76	63	83	57	87	66	82	60

效率的下降。对掺杂密度 1.14×10^{12} 、 2.28×10^{12} 、 3.42×10^{12} 和 $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的 SQW, δ 掺杂导致发光效率分别相对下降 67%、75%、33% 和 75%, 如图 5 (a) 所示。

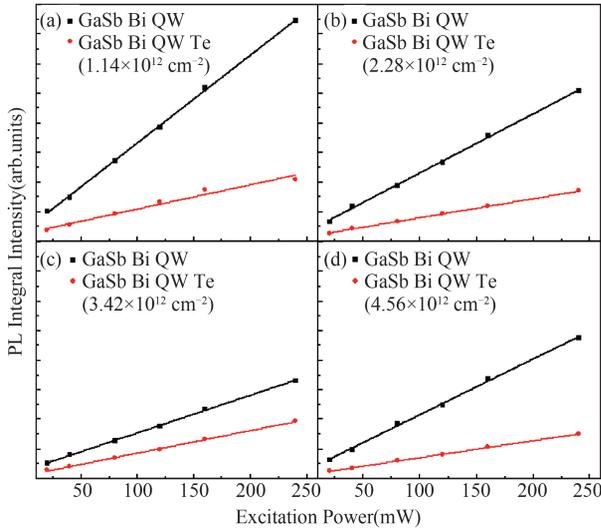


图4 不同面密度 GaSbBi SQW 和其参考样品I区 PL 的变激发功率积分强度, 掺杂面密度分别为 (a) $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (b) $2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (c) $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 和 (d) $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
 Fig. 4 Excitation power-dependent PL integral intensity in region I for GaSbBi SQW samples with different sheet densities and the references. Sheet density: (a) $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (b) $2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (c) $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, and (d) $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

PL 过程中两种机制可能导致发光效率的下降: (i) 掺杂导致界面质量恶化, 光生载流子受到 SQW 的界面散射, 有效注入 SQW 的数量降低, 如图 6 (a) 所示, 点划线表示光生电子在注入 SQW 过程中遭到损失, 发光效率降低原因是“电子损失”; (ii) 掺杂导致 GaSbBi 晶格质量下降, 注入到 SQW 的光生载流子通过非辐射复合而非辐射复合跃迁, 从而降低发光效率, 属于“光子损失”过程, 如图 6 (b) 所示。

为厘清这两种机制, 对与 GaSb 势垒/衬底相关的 II 区 PL 积分强度进行分析。其与激发功率关系如图 7 所示。显然, 对不同掺杂面密度的样品, 积分强度-激发功率斜率均相对于参考样品略有下降。

表3 I 区特征峰积分强度拟合斜率

Table 3 Fitting slopes for PL integral intensity in region I

组别	1		2		3		4	
样品	GaSbBi QW Te	GaSbBi QW						
	$(1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$	
斜率 (mW^{-1})	0.02	0.06	0.01	0.04	0.02	0.03	0.01	0.04

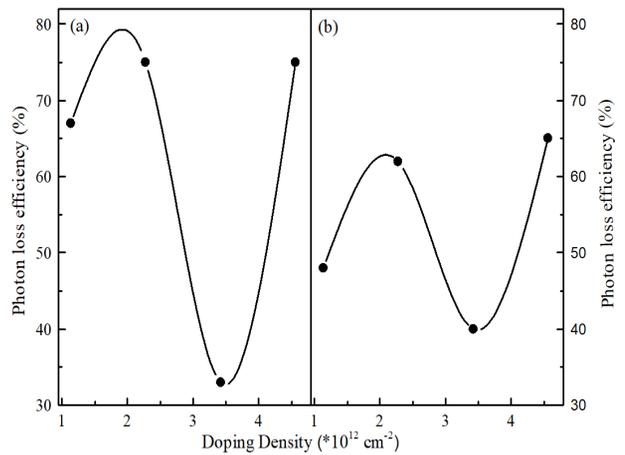


图5 I区(a)和II区(b)发光效率的相对降低
 Fig. 5 Relative reduction of emission efficiency in region I (a) and II (b)

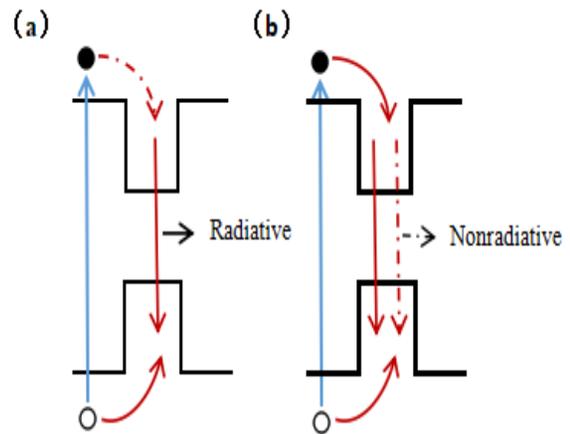


图6 电子跃迁和复合过程示意图
 Fig. 6 The schematic diagram of electronic transition and recombination process

线性拟合所提取的斜率数值列于表 4。对于 II 区 PL 积分强度, 掺杂密度 1.14×10^{12} 、 2.28×10^{12} 、 3.42×10^{12} 和 $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 样品的发光效率分别相对下降 48%、62%、40% 和 65%, 如图 5 (b) 所示。除第 3 组样品外, 这些相对下降率比相应 I 区的低, 由此可见: (i) SQW 界面散射导致“电子损失”机制占非主导地位, 因为电子滞留于 GaSb 势垒/衬底, II 区的发光效率会相应增强; (ii) “电子损失”对 δ 掺杂导致发

光效率下降有作用,从而使II区相对下降率比I区的低。

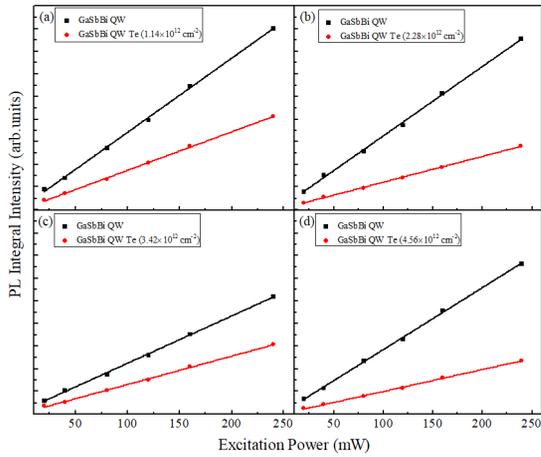


图7 II区PL积分强度的激发功率演化,面密度分别为(a) $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (b) $2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (c) $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 和(d) $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Fig. 7 Excitation power-dependent PL integral intensity in region II, sheet density: (a) $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (b) $2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (c) $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, and (d) $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

更进一步的GaSbBi SQW PL峰值能量随激发功率的演化关系如图8所示,支持“光子损失”是阱内 δ 掺杂导致SQW发光效率的另一重要原因。在20~240 mW的激发功率增强过程中,所有SQW的PL能量均蓝移,蓝移的原因来自于带尾态的填充效应^[36]。显然相比于参考样品仅蓝移4~6 meV,掺杂密度为 1.14×10^{12} 、 2.28×10^{12} 、 3.42×10^{12} 和 $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的SQW样品分别蓝移10、35、37和39 meV,意味着后者的晶格无序度和带尾态更为显著。

3 结论

综上所述,对不同阱内 δ 掺杂面密度GaSb_{0.93}Bi_{0.07} SQW及其非掺杂参考样品的激发功率依赖PL光谱研究的结果表明,GaSbBi SQW的阱内 δ 掺杂导致红外PL发光效率显著降低,相对下降幅度约为33%~75%。发光效率下降可归因于界面恶化引发

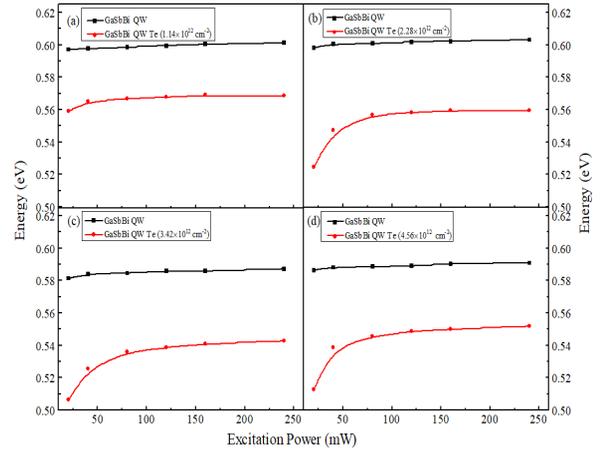


图8 不同掺杂面密度SQW及其参考样品I区特征峰能量与激发功率的关系,面密度分别为(a) $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (b) $2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (c) $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 和(d) $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Fig. 8 PL peak energy vs excitation power for GaSbBi SQWs with different sheet density and the references. Sheet density: (a) $1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (b) $2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, (c) $3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, and (d) $4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

的“电子损失”和阱内晶格质量下降导致的“光子损失”的共同效应。这一结果可望为稀Bi红外发光器件的性能优化提供帮助。

4 致谢

衷心感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所王庶民研究员为本工作提供的GaSbBi QWs系列样品。

References

- [1] Wang L, Zhang L, Li Y, *et al.* Novel Dilute Bismide, Epitaxy, Physical Properties and Device Application[J]. *Crystals*, 2017, **7**(3):63.
- [2] Lee J J, Kim J D, Razeghi M. Room temperature operation of 8 - 12 μm InSbBi infrared photodetectors on GaAs substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **73**(5):602-604.
- [3] Sandall I C, Bastiman F, White B, *et al.* Demonstration of InAsBi photoresponse beyond 3.5 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(17):133.
- [4] Gu Y, Zhang Y, Chen X, *et al.* Nearly lattice-matched short-wave infrared InGaAsBi detectors on InP[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(3):3874.
- [5] Francoeur S, Seong M J, Mascarenhas A, *et al.* Band gap

表4 II区特征峰积分强度拟合斜率

Table 4 Fitting slopes for PL integral intensity in region II

组别	1		2		3		4	
样品	GaSbBi QW Te	GaSbBi QW						
	$(1.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(2.28 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(3.42 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$		$(4.56 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2})$	
斜率(mW^{-1})	0.34	0.65	0.23	0.61	0.25	0.42	0.19	0.55

- of GaAs_{1-x}Bi_x, 0<x<3.6% [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(22):3874–3876.
- [6] Zhou M, Liang R, Zhou Z, *et al.* Potentiality of Bi and Mn co-doped lead-free NaNbO₃ ceramics as a pyroelectric material for uncooled infrared thermal detectors[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, **39**(6):2058–2063.
- [7] Glema J, Palenskis V, Geiutis A, *et al.* Low-Frequency Noise Investigation of 1.09 μm GaAsBi Laser Diodes [J]. *Materials*, 2019, **12**(4):673.
- [8] Lira A, Ramírez M O, Solé J G, *et al.* Photoluminescence of Bi₄Si₃O₁₂:Er³⁺ crystal excited in the commercial laser diode emission region [J]. *Optical Materials*, 2005, **29**(6):605–609.
- [9] Shan W, Walukiewicz W, Iii J W A, *et al.* Band Anticrossing in GaInNAs Alloys [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(6):1221–1224.
- [10] Albert K, Wu J, Walukiewicz W, *et al.* Valence-band anticrossing in mismatched III–V semiconductor alloys [J]. *Physical Review B, Condensed Matter And Materials Physics*, 2007, **75**(4):045203.1–045203.6.
- [11] Francoeur S, Tixier S, Young E, *et al.* Bi isoelectronic impurities in GaAs [J]. *Physical Review B*, 2008, **77**(8):439–446.
- [12] Li H, Wang Z. Bismuth-Containing Compounds [J]. *Springer Series in Materials Science*, 2013.
- [13] Das S C, Das T D, Dhar S. Infrared absorption and Raman spectroscopy studies of InSbBi layers grown by liquid phase epitaxy [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, **55**(4):306–308.
- [14] Rajpalke M K, Linhart W M, Birkett M, *et al.* Growth and properties of GaSbBi alloys [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(14).
- [15] Samajdar D P, Das T D, Dhar S. Valence band anticrossing model for GaSb_{1-x}Bi_x and GaP_{1-x}Bi_x using k·p method [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, **40**:539–542.
- [16] Yoshida J, Kita T, Wada O, *et al.* Temperature Dependence of GaAs_{1-x}Bi_x Band Gap Studied by Photoreflectance Spectroscopy [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, **42**(2A):371–374.
- [17] Fluegel B, Francoeur S, Mascarenhas A, *et al.* Giant spin-orbit bowing in GaAs_{1-x}Bi_x [J], *Phys. Rev. Lett.* 2006, **97**:067205.
- [18] Zhang Y, Yue L, Chen X, *et al.* Wavelength extension in GaSbBi quantum wells using delta-doping [J]. *Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics*, 2018, **744**:667–671.
- [19] Wang S, Zhao Q, Wang X, *et al.* Sadeghi M, Larsson A. 1.3 to 1.5 μm light emission from InGaAs/GaAs quantum wells [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(6):875–877.
- [20] Schubert E F, Horikoshi Y, Ploog K. Radiative electron-hole recombination in a new sawtooth semiconductor superlattice grown by molecular-beam epitaxy [J]. *Physical Review B*, 1985, **32**(2):1085–1089.
- [21] Harris J J. Delta-doping of semiconductors [J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 1993.
- [22] Chen X, Song Y, Zhu L, *et al.* Shallow-terrace-like interface in dilute-bismuth GaSb/AlGaSb single quantum wells evidenced by photoluminescence [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(15):153505–153507.
- [23] Shao J, Lu W, Lu X, *et al.* Modulated photoluminescence spectroscopy with a step-scan Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(6):063104.
- [24] Filipchenko A S, Kurenkeev T B, Bolshakov L P, *et al.* Photoluminescence of heavily doped n-type gallium antimonide [J]. *Physica Status Solidi A–Applied Research*, 1978, **48**(2):281–285.
- [25] Bignazzi A, Bosacchi A, Magnanini R. Photoluminescence study of heavy doping effects in Te-doped GaSb [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, **81**(11):7540–7547.
- [26] Shao J, Lu X, Yue F, *et al.* Magnetophotoluminescence study of Ga_{0.9}In_{0.1}P quantum wells with CuPt-type long-range ordering [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(5):053522.
- [27] Shao J, Lu C, Wei L, *et al.* Backside-illuminated infrared photoluminescence and photoreflectance: Probe of vertical nonuniformity of HgCdTe on GaAs [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(12):121915.
- [28] Shao J, Lu W, Tsen G, *et al.* Mechanisms of infrared photoluminescence in HgTe/HgCdTe superlattice [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(6):063512.
- [29] Shao J, Qi Z, Zhao H, *et al.* Photoluminescence probing of interface evolution with annealing in InGa(N)As/GaAs single quantum wells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **118**(16):165305.
- [30] Yamashita K, Yoshimoto M, Oe K. Temperature-insensitive refractive index of GaAsBi alloy for laser diode in WDM optical communication [J]. *Physica Status Solidi. C, Conferences and critical reviews*, 2006, **3**(3):693–696.
- [31] Gladysiewicz M, Kudrawiec R, Wartak M S. Electronic band structure and material gain of III–V–Bi quantum wells grown on GaSb substrate and dedicated for mid-infrared spectral range [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **119**(7):553–226.
- [32] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(11):5815–5875.
- [33] Chen X, Zhao H, Wu X, *et al.* Bi-Induced Electron Concentration Enhancement Being Responsible for Photoluminescence Blueshift and Broadening in InAs Films [J]. *Physica Status Solidi (b)*, 2019, **256**(5).
- [34] Yue, Li, Chen, *et al.* Molecular beam epitaxy growth and optical properties of high bismuth content GaSb_{1-x}Bi_x thin films [J]. *Journal of Alloys and Compounds: An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics*, 2018, **742**:780–789.
- [35] WANG Jian, HUANG Xian, LIU Li, *et al.* Effect of Temperature and Current on LED Luminous Efficiency [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, (王健, 黄先, 刘丽, 等. 温度和电流对白光 LED 发光效率的影响. *发光学报*) 2008, **29**(2):358–362.
- [36] Yan B, Chen X, Zhu L, *et al.* Bismuth-induced band-tail states in GaAsBi probed by photoluminescence [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(5):052104.