

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0001-04

纳米特征辐射及其实例

王绍民¹, 沈永行¹, 徐锦心¹, 胡来归¹, 祝捷¹, 杨德仁², 张辉², 姚建铨³

(浙江大学¹物理系; ²硅材料国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; ³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 在室温下用多种半导体激光器(LD)输出光束照射真空中的纳米材料, 样品呈现可见、刺眼的强白光新辐射。不同纳米材料的发光情况既有共性, 又有个性, 如某些半导体材料不仅发射可见光而且还产生很强的紫外光, 其实例就是常规的 InGaAs 多量子阱 LD 中自身的深紫外辐射现象。

关键词 激光物理; 纳米特征辐射; 半导体激光器; 光谱测量; 深紫外辐射

中图分类号 TN241

文献标识码 A

Radiation from Nanostructured Materials and Example

WANG Shao-min¹, SHEN Yong-hang¹, XU Jin-xin¹, HU Lai-gui¹, ZHU Jie¹,
YANG De-ren², ZHANG Hui², YAO Jian-quan³

(¹Department of Physics; ²State Key Lab of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(³Institute of Lasers and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A visible, white and dazzling radiation was observed at room temperature when the nanostructured materials in vacuum were irradiated by many kinds of semiconductor laser diodes (LDs). The photoluminescence from different nano-materials have common property as well as individual characteristics. Some nanostructured semiconductor can be stimulated to emit an ultraviolet radiation besides visible light. A normal InGaAs LD operating at 980 nm is a typical example, which possesses a strong deep UV emission at room temperature.

Key words laser physics; nano-radiation; semiconductor laser; spectral measurement; deep ultraviolet radiation

1 引言

纳米材料具有很多传统材料不具备的新特性, 已引起人们的极大兴趣^[1,2]。Canham 发现在室温下用蓝绿光照射纳米多孔硅可以产生红光^[3], 这个现象的发现掀起了对纳米材料光学性质研究的高潮^[4,5], 我们发现很多纳米材料有着惊人的发光特性^[6]。

目前, 半导体激光器(LD)的有源层厚度都做成数十纳米以下, 此时激光器既具有纳米尺寸的特点, 又存在由纳米结构组合引起的新的效应。实验中, 发现常规的 InGaAs 多量子阱 LD 除了发射 980 nm 红外激光和倍频 490 nm 蓝绿光以外, 还存在深紫外辐射。通过对多种纳米材料的光致发光实验表明, 深紫外辐射是由半导体材料的纳米尺寸导致的一种最新发现的效应。

2 纳米碳的特征辐射

所使用的非氢化无定形碳(a-C)是通过不完全燃烧法制得的, 用扫描电镜和透射电镜检测, 其结构为链状, 粒径为 30~80 nm。若将波长为 980 nm, 功率约为 1 W 的激光束聚焦后照射真空中的 a-C, 发现激光被样品强吸收并发出刺眼的白光, 测量它的光致发光谱, 可以看出发光谱覆盖了整个可见光的范围。实验证明, 只有功率密度达到某一阈值时才会出现这种现象, 而且这一阈值同真空度成比例关系, 真空度越高, 阈值就越低。另外, 激发石墨粉, 纳米碳管, C₆₀ 以及油墨字等发现很多纳米材料都具有类似的现象, 但是, a-C 的转换效率最高, 超过 50%。进一步采用波长为 808 nm, 780 nm, 655 nm 和 404 nm 的 LD 作为激发光源, 通过透镜聚焦使焦点处的功率密度达到 1 kW/cm²~1 MW/cm² 之间, 重复上述实验, 发现纳

基金项目: 国家自然科学基金(60276035)和航天支撑技术项目(2002-HT-ZJDX-08)资助课题。

作者简介: 王绍民(1938-), 男, 浙江大学物理系教授。主要从事光束变换和纳米光学的研究。E-mail: optics@zju.edu.cn

米材料发光与激发光源的波长无关。通常情况下,很多发光都服从斯托克斯定律,而纳米碳的强白光辐射同时也具有反斯托克斯的特征,我们认为,这是一个上转换连同下转换的量子级联过程,并且它的发光以量子辐射为主,并同时伴有热辐射^[6]。

3 InGaAs 激光器中的纳米特征辐射

由于 LD 的有源层厚度做到纳米量级,其发光性质就具备了一些新的效应,比如单波长辐射的激光器就存在着纳米特征辐射的现象。

3.1 单波长辐射 LD 的多波长输出

采用海特光电责任有限公司生产的 InGaAs 多量子阱 LD,出射波长为 980 nm,功率为 1~2 W,出乎意料的是用肉眼观察发现激光器除了发红光之外还有蓝绿光。为了验证这个现象,在 LD 的出射窗口放置一块透射谱如图 1(a)所示的 GRB3 滤光片,然后用 HR2000 高分辨率的光纤光谱仪测量它的激光谱,如图 1(b)所示。从图中可见该激光器主要有三个发射峰:980 nm 近红外光,490 nm 蓝绿光和深紫外特征谱。

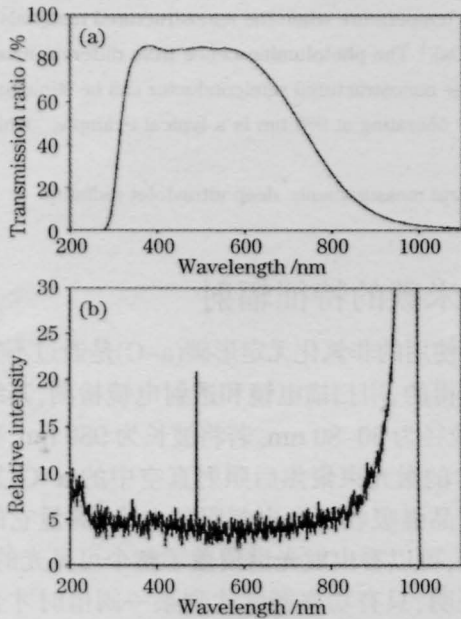


图 1 (a) GRB3 滤光片的透射曲线;(b) InGaAs 量子阱 LD 的发射谱

Fig.1 (a) The transmission curve of a GRB3 optical filter; (b) Optical emission spectra of the InGaAs quantum-well LD

在显微镜下观察 LD 的近场发光图可以发现蓝绿光和近红外光是从不同层发射出来的,这两束光不能同时聚焦,如图 2(a)所示。图中上面那条聚焦好的窄条代表蓝绿光,下面发散的宽条代表红外光。由于柯达胶卷对紫外区作了截断,所以紫外光不能

在胶卷上曝光。

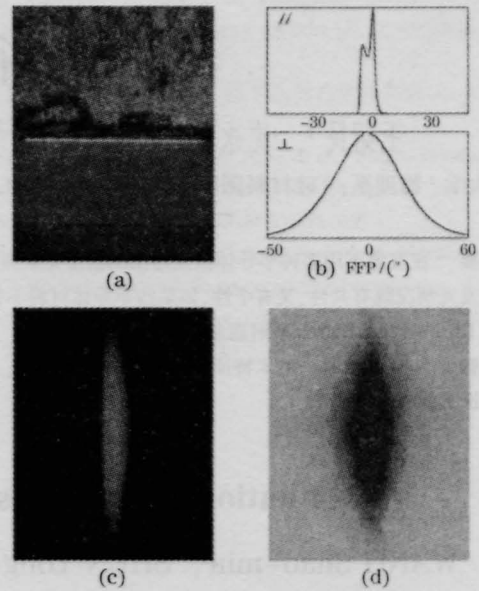


图 2 InGaAs 量子阱 LD 的发光模式。(a)近红外光和蓝绿光的近场图;(b)厂家提供的近红外光的远场模式;(c)蓝绿光的远场图;(d)深紫外的远场图

Fig.2 Optical patterns of the InGaAs LD. (a) Near-field optical microscopic image of the infrared and the blue-green emissions; (b) The far-field picture (FFP) of the emission at 980 nm given by the manufacturer; (c) The FFP of the blue-green radiation; (d) The FFP the UV emission

980 nm 的红外激光是主激射,它是由量子阱层 InGaAs 材料的禁带宽度所决定的。图 2(b)是厂家提供的 980 nm 激光束的远场图,从中可以看出平行结方向的光场是多模,垂直结方向的光场是单模,远场发散角分别为 8°和 45°。经过反复多次的实验发现,蓝绿光的峰值波长是主激射波长的一半并随之移动,因此推断蓝绿光是近红外光侧面抽运不同层的倍频光。用 NOVA 激光功率计测量这个倍频光的功率大约在 10 μW 左右,远场光斑如图 2(c)所示。

InGaAs LD 存在深紫外辐射是本实验中最重要发现。为了观察它的远场图,让激光束通过中心波长为 239 nm,峰值透过率为 21.8%,透射宽度为 21 nm 的干涉滤光片,然后在 X 光片上曝光得到光斑图如图 2(d)所示。由于该 LD 发射的紫外谱较宽,所以这里采用中心波长为 223 nm,239 nm,252 nm 和 271 nm 的干涉滤光片分别滤光,然后用 NOVA 激光功率计探测透射光场的功率。考虑到各个滤光片的透射谱,估计该激光器的紫外辐射功率接近于 0.1 mW。

如果对激光器作些改造则还可以进一步提高紫

外光的输出功率, 比如镀一组增反膜使腔镜对 980 nm 红外光的反射率从 10% 提高到 30%, 则镀膜前后激光器输出红外光的相对光强减弱, 而蓝绿光和紫外的光强增强, 如图 3(a) 和 (b) 所示。这里采用 WDP500-D 型自动扫描光栅单色仪测量该 LD 的输出谱。

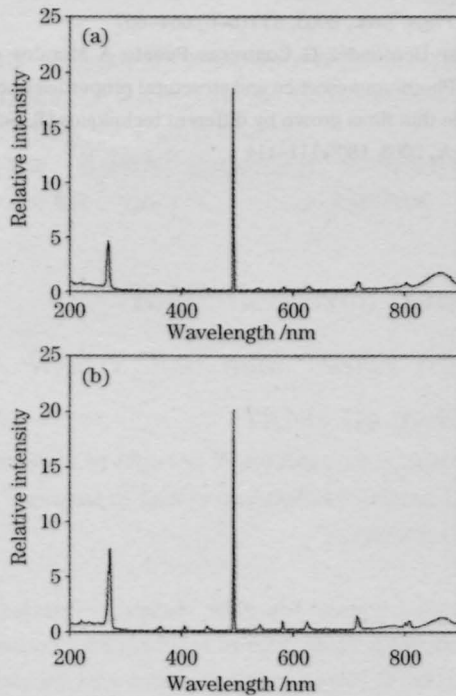


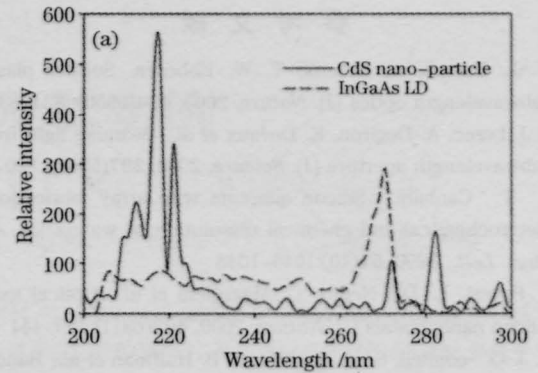
图 3 激光器镀膜前(a)后(b)的发射谱
Fig.3 Optical emission spectra of the LD.
(a) Before coating; (b) After coating

3.2 半导体材料的纳米特征辐射

短波长激光是近几年的一个研究热点。目前主要采用宽禁带宽度的材料来实现紫外辐射。虽然至今还不清楚 InGaAs LD 中的紫外光是从什么材料中发射出来, 但根据大量的实验结果可认为这是由半导体材料的纳米结构所导致的一种特征辐射。

其中的一个验证实验就是 CdS 纳米粉的光致发光谱。当 980 nm LD 的输出光束用透镜聚焦后照射真空中的纳米颗粒结构的 CdS 上时, 样品发出耀眼的白光。用光栅单色仪检测样品的发光谱, 发现除了可见光光谱外, 在深紫外区也有较强的谱线, 如图 4(a) 所示, 与激光器本身的紫外辐射相比, CdS 纳米材料的发射波长更短。若将样品替换成柱状的 CdS 重复上述实验, 可以得到相似的结果。很明显这与已报道的 CdS 光致发光现象^[7,8]完全不一样, 而且转换效率高得多。

为了进一步说明这个问题, 半定量地测量了纳米碳、颗粒结构和柱状 CdS 的发光功率, 如图 4(b)



(b) LD/Materials	Power / μ W
InGaAs LD	0.5
C nano-powder	0.5
CdS nano-rod	1.2
CdS nano-particle	1.8

图 4 CdS 的紫外辐射现象。(a) 光谱图; (b) 功率图
Fig.4 UV emission from a piece of CdS nano-particle
(a) UV spectra; (b) power values

所示。实验中, LD 输出的光束用一组玻璃透镜聚焦, 而功率计的探测头上覆盖了一块紫外干涉滤光片(中心波长为 223 nm, 峰值透过率为 22.4%, 透射谱宽为 20 nm), 图中给出的数据是功率计的直接读数, 没有经过任何换算。因为样品发射出来的光有很宽的谱线和很大的发散角而滤光片的透射谱较窄、透射率较低, 所以功率计显示的数据远远小于实际的发光功率。当然, 在测量样品的辐射功率时, 激发光源的部分散射光也会被功率计所接收, 为此, 图中同时给出了功率计测量激发光源聚焦后光束的总功率值, 比较后可以确定某些半导体纳米材料确实具有较强紫外辐射的特性。因此, 除了优化谐振腔的结构外还可以通过掺杂不同的半导体纳米材料来调节 LD 紫外输出的波长和功率。

4 结 论

纳米材料的特征辐射具有类似自然光的性质, 现象和激光几乎完全相反, 而且发光材料的尺寸是纳米量级, 所以这是一种非常接近理想的点光源。更重要的是, 某些半导体纳米材料具有较强深紫外辐射的特性, 这给紫外激光的研究带来了新的希望。虽然到目前为止, 对纳米特征辐射的发光机理不是很清楚, 但这是激光、发光、物理、化学、材料和计量多学科交叉的亮点, 蕴含着巨大的学术和应用潜力。

参 考 文 献

- 1 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830
- 2 H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux *et al.*. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 820-822
- 3 L. T. Canham. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(10):1046-1048
- 4 L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni *et al.*. Optical gain in silicon nanocrystals [J]. *Nature*, 2000, **408**(6811):440-444
- 5 M. J. O'Connell, S. M. Bachilo, C. B. Huffman *et al.*. Band gap fluorescence from individual single-walled carbon nanotubes [J]. *Science*, 2002, **297**(5581):593-596
- 6 Wang Shaomin, Hu Laigui, Lü Zhongde *et al.*. White and bright radiation from nanostructured carbon [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 215-220
王绍民, 胡来归, 吕章德等. 纳米碳的白光强辐射[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(2):215-220
- 7 Zhang Hui, Ma Xiangyang, Ji Yujie *et al.*. Single crystalline CdS nanorods fabricated by a novel hydrothermal method [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, **377**(5-6):654-657
- 8 J. Aguilar-Hernández, G. Contreras-Puente, A. Morales-Acevedo *et al.*. Photoluminescence and structural properties of cadmium sulphide thin films grown by different techniques [J]. *Semicond. Sci. Tech.*, 2003, **18**(2):111-114