

金属有机化学气相沉积外延技术生长 GaN 基半导体发光二极管和激光二极管(II)*

王涛^{1,2} 姚键全¹ 张国义^{2,†}

(1 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所 教育部光电信息技术科学重点实验室 天津 300072)

(2 北京大学物理学院宽禁带半导体材料研究中心 北京 100871)

(接 2005 年第 9 期第 699 页)

3 金属有机化学气相沉积外延技术生长以蓝宝石为衬底 InGaN/GaN 基激光二极管

如今, InGaN/GaN 基量子阱发光二极管已经商业化, 而且 InGaN/GaN 基量子阱激光二极管已实现连续波室温运转, 使用寿命超过 10000 小时^[27]. 虽然如此, 但还没有完全搞清楚这些器件的发光机理. 试验中通常使用连续输出 He - Cd 激光器(325 nm) 作光源, 或者使用 20—50 mA 注入电流来研究 InGaN 量子阱样品或发光二极管光学性质. 本文上篇研究了量子阱厚度与发光二极管发光功率的关系, InGaN 和 GaN 之间的晶格失配产生压电场, 从而导致量子束缚斯塔克效应, 而量子束缚斯塔克效应强烈地影响着发光二极管的性能, 这一点对进一步提高发光二极管的性能非常重要. 可是, InGaN/GaN 量子阱受激辐射的机理不同于发光二极管的自发辐射机理, 因为受激辐射通常在特别高的载流子注入情况下发生. 举例来说, 典型的 $350 \times 350 \mu\text{m}^2$ 蓝光发光二极管芯片通常在 20—50 mA 注入电流下工作, 其注入电流密度一般为 A/cm^2 的量级. 然而, 与之形成鲜明对比的是, 发射激光的阈值电流密度通常高达几 kA/cm^2 , 与发光二极管工作电流密度相比较, 高出 3 个数量级. 类似地, 在光抽运情况下, 用高功率的飞秒脉冲激光器产生受激辐射, 其激励功率密度比连续输出 He - Cd 激光器高几个数量级. 因此, 为了进一步提高 InGaN/GaN 基激光二极管的性能, 在受激辐射情况下讨论 InGaN/GaN 量子阱的发光机理是极其必要的, 这也是本文的目的所在. 这一节中, 我们分别用一个连续运转的 He - Cd 激光器和一个室温运转的脉冲激光器作光源, 研究 InGaN/GaN 多量子阱结构的光学特性, 结果显示, 随

着量子阱厚度的变化, 其受激辐射行为出现了很大的差异. 差异出现的原因可以归结于量子束缚斯塔克效应. 同时也讨论了如何设计 InGaN/GaN 基激光二极管.

3.1 InGaN/GaN 中量子阱厚度对受激辐射的影响^[28]

所有 10 个周期的 InGaN/GaN 多量子阱样品均在(0001)晶向蓝宝石衬底上生长. 每个样品的势垒层厚度都是 7.5 nm, 量子阱厚度分别为 1.5, 2.0, 2.5, 3.5 和 4 nm, 铟摩尔浓度都是 11.8%, 把样品依次分别标记为 A, B, C, D 和 E. 样品的厚度和铟摩尔浓度都通过 X 射线谱测量得到.

采用 10 mW 的 He - Cd 激光器作光源, 测定所有样品的自发辐射光致发光光谱. 图 10(a)所示为样品在室温下的光致发光光谱. 每个光谱图中, 都有一个很强的发光峰, 其发光峰波长随着量子阱厚度的增大而增大. 在这里我们更关心的是图 10(b)中所示的发光峰强度, 从其中可以看出, 发光峰强度随着量子阱厚度的增加而增加, 当量子阱厚度超过 2 nm 之后, 进一步增大量子阱厚度, 发光峰强度减小, 和其他研究者报道一致^[29].

上一篇文章我们讨论过量子束缚斯塔克效应极大地影响 InGaN/GaN 量子阱光学性质, 这就可以解释图 10(b)中光致发光强度随量子阱的厚度变化关系. 在薄量子阱中, 比如 1.5 和 2 nm 的量子阱样品, 量子束缚斯塔克效应是很弱的, 因此, 同 AlGaAs/GaAs 系统类似, 样品 B 的光致发光强度就高于样品 A. 当量子阱厚度超过 2 nm 之后, 量子束缚斯塔克效应主宰量子阱发光机制, 就像上一篇文章我们讨论

* 国家自然科学基金(批准号 60376005)、长江教授基金资助项目

2004 - 10 - 15 收到初稿, 2005 - 04 - 10 修回

† 通讯联系人. Email : gyzhang@ pku. edu. cn

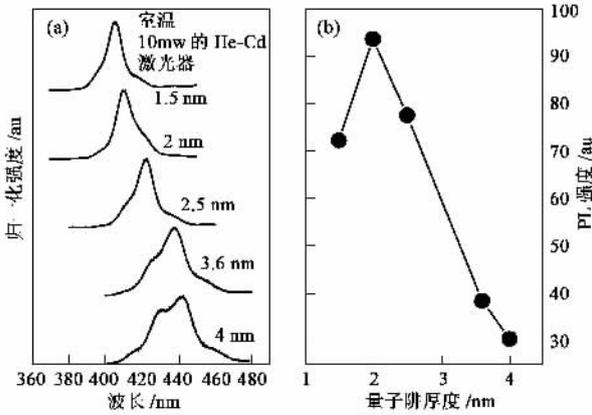


图 10 (a)不同量子阱厚度对应的室温光致发光光谱 (b)光致发光强度与量子阱的厚度变化关系(10 mW 的 He - Cd 激光器作光源)^[28]

过^[2,3,5,6]随着量子阱厚度的增加,光致发光强度减小.通过对 InGaN/GaN 发光二极管量子阱厚度和发光功率的研究,以及作者以前的研究表明,室温光致发光强度越高,它的发光功率也越高,这同 He - Cd 激光器作为光源所作室温光致发光光谱和小注入电流下进行的发光二极管光功率的研究结果是一致的.^[26]

采用一个再生放大钛宝石飞秒激光器作光源,研究高激发情况下的受激辐射.该激光器重复频率为 1kHz,运转波长 800nm,利用三倍频变换到 267nm 作激励源.每个样品的受激辐射行为相似.作为例子,图 11(a)给出样品 D 在光抽运密度从 33 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 到 190 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时的室温光谱.在低抽运功率下,只有一个自发辐射峰,抽运功率增加到 120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 附近时,在旁边出现另一个高能峰.而且,进一步增大光抽运功率,这个峰戏剧性地变窄和变强,表明经历一个受激辐射过程.图 11(a)同时也给出了激发光谱峰强度随激发能量密度的关系,从图中可以看出,激射阈值光抽运功率大概是 120 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.图 11(b)给出激射阈值光抽运功率同量子阱厚度的关系图,阈值光抽运功率随着量子阱厚度的增加而单调减小.比较图 10(b)中量子阱厚度和室温光致发光强度的关系可知,室温光致发光强度和量子阱厚度的依赖关系完全不同于阈值功率强度和量子阱厚度的依赖关系.具有最高光致发光强度的样品 B 具有最大的受激阈值光抽运功率,而具有最低光致发光强度的样品 E 却具有最小的受激辐射阈值光抽运功率.因此在激光二极管的设计中不能通过 He - Cd 激光为光源的光致发光强度大小来判定

InGaN/GaN 多量子阱光学质量的好坏.这点同 In-GaN/GaN 基发光二极管的情况形成鲜明的对比^[26,31].

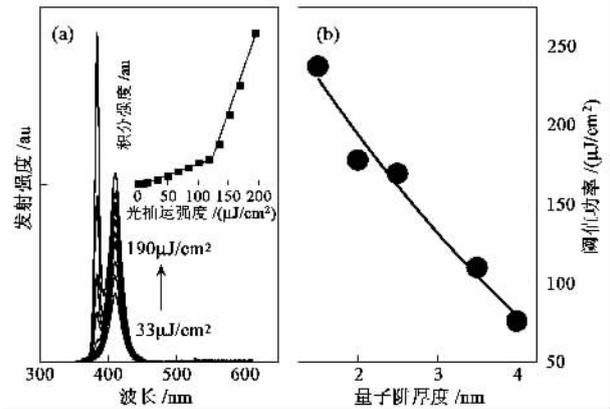


图 11 (a)样品 D 的受激辐射光谱 (b)受激辐射阈值光抽运功率与量子阱厚度的关系^[28]

受激辐射时的载流子密度和由 He - Cd 激光器或者 20 mA 注入电流激励的自发辐射载流子密度相差甚远,这点是显而易见的.要想在 InGaN/GaN 多量子阱中观察受激辐射,必须提供非常高的激发功率密度,通常,阈值密度约为 100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 或者更高.根据我们的最近报道^[30],可以估计,薄片中的载流子浓度在 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 到 $8 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 之间,相当于 InGaN/GaN 基 LD 中的阈值电流密度(高达几十 kA/cm^2).我们采用 Ridley 的方法^[32],大致计算一下由于载流子的注入而引起的屏蔽长度来估算屏蔽效应,由于载流子的注入而引起的屏蔽长度的表达式为 $\lambda = 2\epsilon kT/e^2 n$ (n 是载流子浓度, ϵ 是静电常数).因为在受激辐射过程中,由于非常高的激发功率密度, n 很大,所以有 $\lambda \ll L_z$ (L_z 是量子阱厚度),这意味着可以完全屏蔽量子束缚斯塔克效应.换句话说,在如此高的激励情况下,可以安全地忽略量子束缚斯塔克效应.在这种情况下,像 AlGaAs/GaAs 系统一样,随着量子阱厚度的增加,阈值抽运功率下降.正是这个原因,可观察到样品 E 具有最低的阈值.相反,在 He - Cd 激光为光源情况下,注入的激励功率密度大概为 40 W/cm^2 ,产生的载流子浓度约为 $1.7 \times 10^{10}/\text{cm}^2$,一般载流子复合寿命采用 260 ps,假设完全吸收和 100% 的俘获效率^[33].对于一个大小为 $350 \times 350 \mu\text{m}^2$ 的 InGaN/GaN 发光二极管芯片,在 20—50 mA 的注入电流下,其载流子浓度也就在 $10^{10}/\text{cm}^2$ 量级.此种情况下, $\lambda > L_z$,表明量子束缚斯塔克效应不可能被屏蔽掉.而且如上一篇所

述 随量子阱厚度增加,量子束缚斯塔克效应随之增强,导致光致发光强度减弱.

3.2 InGaN/GaN 基激光二极管的生长

在以上研究 InGaN/GaN 对量子阱的光学特性的基础上,我们获悉 InGaN/GaN 对量子阱的发光机制以及它对发光二极管和激光二极管的影响.下面简要介绍作者用金属有机化学气相沉积外延技术生长制备 InGaN/GaN 基 LD 和它的光学特性.用蓝宝石为衬底,激光二极管的结构为:一个 25 nm 厚的低温 GaN 缓冲层,2 μm 厚的 n 型 GaN:Si;一层 2 μm 厚的不同掺杂浓度的 n 型 GaN:Si;Al_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN 的调制掺杂超晶格用作光场限制层,该层含有 150 个周期的 2 nm 厚度掺 Si-GaN 和 2 nm 厚的 Al_{0.18}Ga_{0.82}N;一层 0.1 μm 厚掺 Si-GaN 用作波导层,然后是 2.5 nm 的 In_{0.10}Ga_{0.90}N/GaN 多量子阱有源区,20 nm 掺镁 Al_{0.18}Ga_{0.82}N 电子阻挡层,0.1 μm 厚的掺镁 GaN 用作 p 型波导层,然后是 p 型调制掺杂超晶格,最后是 250 nm 厚的重掺镁 GaN 层,以期获得良好的 p 型电极.详细的结构如图 13 所示.在生长多量子阱时,通入 SiH₄ 可进一步提高 InGaN/GaN 多量子阱的质量.在我们以前的报道中,曾经详细研究过 SiH₄ 的作用^[34].

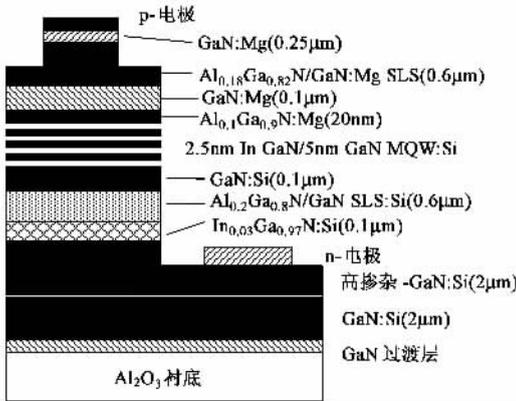


图 12 激光二极管结构示意图^[35]

通常采用传统的方法制造脊形激光二极管.蓝宝石机械减薄后,沿着{1100}方向解理,激光腔面没有镀任何反射膜,腔宽度为 10 μm.用标准的 Ni/Au 和 Ti/Al/Au 合金分别作 p 型和 n 型电极.在脉冲电流注入模式下测量 LD 的电光特性.

图 13(a)给出激光二极管电注入激射发光谱,其激射发光峰半高宽为 0.3 nm.图 13(b)是腔长为 0.58 mm 的激光二极管在室温下发光功率与脉冲注

入电流的关系.激光器阈值电流密度 λ_0 约为 32.5 kA/cm² 获得最高高达 40 mW 的激光功率.为了判断激光器的偏振模式,我们进行了偏振性测量,结果如图 14(b)所示的 TE 模式.图 14(a)是相机记录下的激光远场光斑图.

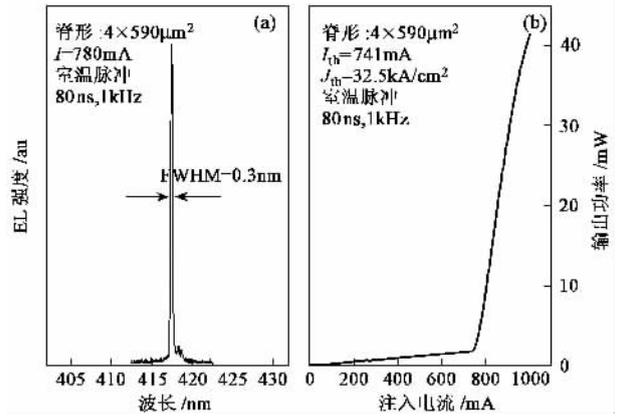


图 13 (a)室温和注入电流 780 mA 时的光谱图 (b)注入电流 - 输出功率关系曲线

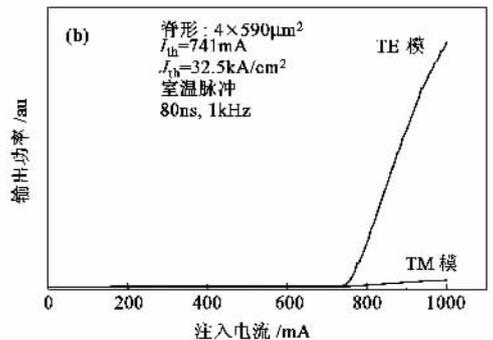
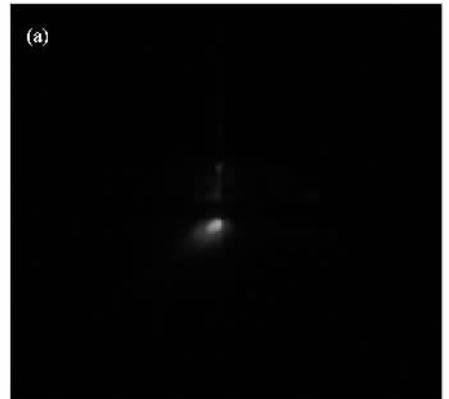


图 14 (a)激光远场光斑图案 (b)激光偏振模式测量图

4 在 A 面蓝宝石 (Al₂O₃) 上生长的 GaN

迄今为止,绝大部分发表的论文中,GaN 薄膜和 GaN 基器件都是在(0001)晶向的(也就是 C 面)蓝

表3 (1120)和(0001)蓝宝石衬底上生长的 GaN 外延层的结构和光学特性比较

	$a/\text{\AA}$	(102)FWHM/(arc sec)	$c/\text{\AA}$	(002)FWHM/(arc sec)	PL 能量/eV	PL FWHM/meV
Al_2O_3 (1120)上生长 GaN	3.1851	350	5.1890	283	3.488	7
Al_2O_3 (0001)上生长 GaN	3.1872	326	5.1874	311	3.484	5

宝石衬底上生长的^[27,36-42].但在(1120)晶向(A面)蓝宝石上生长有更多好处,比如更容易解理和容易获得更大尺寸并且无裂纹的 GaN 外延片.蓝宝石晶体的解理面位于(1102)方向^[43].晶面(1102)与(0001)垂直,和(1100)方向的夹角约为 58° .因此,在A面蓝宝石上生长的 GaN 更容易解理,因而容易制备激光器.另外,在A面或者R面蓝宝石衬底上生长可以获得超过6英寸的无裂纹 GaN 外延片,这对于 GaN 基电子器件是很重要的.因此,研究在A面蓝宝石衬底上生长 GaN 和研究 GaN 结构是非常有意义的.通过比较可以发现,在A面和C面蓝宝石上生长的 GaN 在结构和光学特性方面存在着一些差异.

为了比较A面(样品A)和C面(样品B)蓝宝石衬底上生长的 GaN 的不同特性,用金属有机化学气相沉积外延技术生长了 $2\mu\text{m}$ 厚的 GaN 外延层.两个样品的结构和光学特性列于表3.

图15所示为两个样品 GaN 层的(002)衍射峰的位置,可以看出,二者几乎一样.进一步的研究表明,在(1120)方向的 GaN 没有任何衍射峰,这说明在(1120)方向的蓝宝石衬底上生长的 GaN 仍然沿着(0001)方向生长.两个样品的衍射峰强度几乎相同,其半高宽也相差不大(见表1).另外,可以发现,样品A的(002)衍射峰位比样品B略小,而样品A的衍射峰位在(102)方向略高.所有这些情况表明,在(1120)蓝宝石衬底上生长的 GaN 比在(0001)生长的有更大的 c 轴晶格常数和更小的 a 轴晶格常数,因为两个样品在相同的条件下生长,并且厚度也相同,所以可以得出结论:在(1120)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 比在(0001)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 受到更大的应力.基于上面计算的 c 轴晶格常数,应力增加了0.03%.

GaN 层中的应力对光致发光能量是很灵敏的,温度为10 K时,两个样品的低温光致发光测量结果如图16所示.每种情况都有一个很强并且很窄的光致发光峰.另外,在样品A的强光致发光峰低能量一侧,有一些非常弱的峰,而在样品B中,因为其太弱,所以观察不到.其原因通常被认为是,在(1120)蓝宝石衬底上生长的 GaN 比在(0001)上生长的

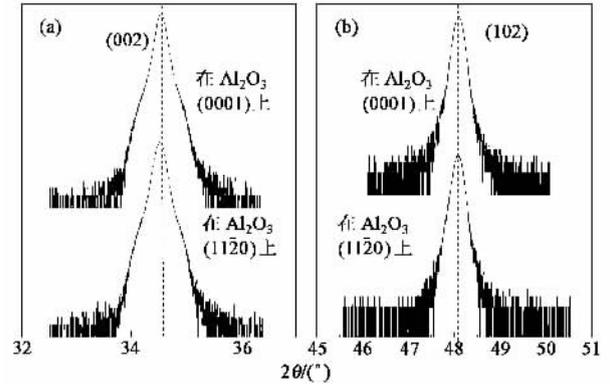


图15 在(1120)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 和在(0001)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 样品的 XRD 衍射谱(a) χ (002)晶向(b) χ (1120)晶向^[51]

GaN 有更多的堆垛层错或闪锌矿结构^[44].这个结果和下面将提到的 TEM 研究结果很好地吻合.图16(b)给出了3.48 eV附近更精细的光致发光光谱.每种情形都是一个较低能量的光致发光峰和一个很强的光致发光峰.正如我们所知道的,高能量的光致发光峰源于自由激子,低能量峰源于束缚激子(通常标记为 I_2).从图中也可以看出,在(1120)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 比在(0001)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 有4.5 meV的蓝移.基于上面的XRD结果,蓝移应该归因于应力的增加.根据线性系数 $\Delta E/\Delta \varepsilon_{zz} = 154\text{meV}$ ^[46](ε_{zz} 为沿 z 轴的应力)对0.03%应力而言,光致发光峰能量的蓝移大概是4.5 meV,此结果同图16(b)中显示的结果很好地吻合.

我们来研究 GaN 外延层和(1120)蓝宝石衬底之间的方向关系,以解释上面观察到的应力增加.图17(a)和(b)分别是(1120)蓝宝石衬底上生长的 GaN 近(1120)和(1100)轴方向的 GaN/蓝宝石界面之间的选区电子衍射.图18(a)中的两个电子衍射图,箭头指示 GaN 层近(1120)轴的,三角形指示近(1100)轴的.在倒晶格空间中, GaN(1100)族平面平行于蓝宝石(0001)族平面,因此 GaN 的(1100)平行于蓝宝石的(0001)方向.图18(b)为(1100)GaN 和(0001)蓝宝石的衍射图,用六角形表示蓝宝石的(0001)衍射图.虽然衍射点之间没有

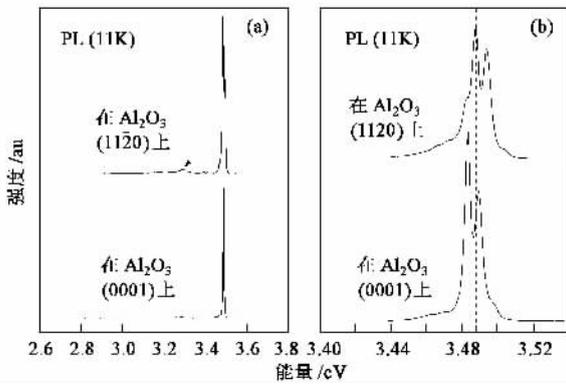


图 16 (a)在(1120)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 和在(0001)晶向的蓝宝石衬底生长的 GaN 样品光致发光光谱 (b)它们的高分辨光致发光光谱^[51]

一一匹配,但仍可以得到在 GaN 层和(1120)蓝宝石衬底之间有一个好的外延方向关系 $(1\bar{1}20)_{\text{GaN}} // (1\bar{1}00)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 $(1\bar{1}00)_{\text{GaN}} // (0001)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$. 这个结果不同于采用等离子辅助分子束外延技术生长 GaN 的报道^[34] $(1\bar{1}20)_{\text{GaN}} // (0001)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 $(1\bar{1}00)_{\text{GaN}} // (1\bar{1}00)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$. GaN 生长前的氮化处理程序和不同的生长技术可能是形成差异的原因. 通常 MOCVD 方法生长 GaN 的温度比 MBE 方法生长高许多. 图 18 (c)为 GaN 层和(1120)蓝宝石界面附近的形貌. GaN 区域中标记的“ d_1 ”(~5.2Å)的晶格平面对应于 GaN 的(0001)面,蓝宝石区域中标记为“ d_2 ”(~4.3Å)的晶格平面对应于蓝宝石的(0002)面. 箭头所指的方向表明蓝宝石的(0002)面平行于 GaN 的(1100)面. 从图 18 也可以看出,在刚开始生长的 GaN 外延层中,确实存在着堆垛层错,这在我们最近的论文中有研究^[47].

接下来,采用结晶学理论来解释外延层的生长机理.(1120)向蓝宝石结构为 O^{2-} 近似成六角密积排列, Al^{3+} 占据 2/3 的八面体空位^[48]. 通常,像蓝宝石这样的氧化物为离子晶体,氧离子被尺寸较小的阳离子紧紧地吸引着. 因此,蓝宝石晶胞的表面是氧原子^[48]. 图 18(a)为蓝宝石原子排列在(1120)方向的投影图. 可见,氧离子在表面形成六边形结构,沿(0002)和(1110)方向的原子距离分别是 4.33Å 和 2.75Å. 图 20(b)为(0001)向 GaN 外延层和(1120) Al_2O_3 结晶学示意图,图中仅简单地画出了 Ga 和 O 原子. 因为界面处的氧原子近似成六角形结构,所以在 GaN 外延层中形成的 GaO 也是六角形的. 图 18(a)中的虚线是蓝宝石(1102)解理面的投影,它大致和图 18(b)中 GaN 的(1120)面(虚线所示)平行.

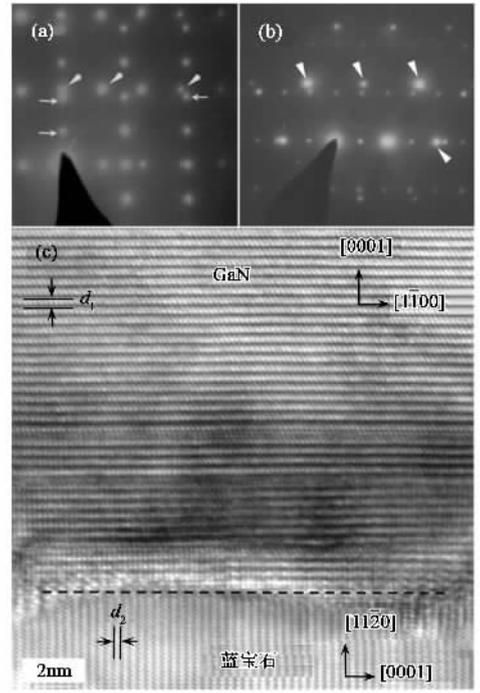


图 17 (1120)蓝宝石为衬底生长的 GaN 在位于 GaN 和蓝宝石衬底的界面选区衍射谱 (a)(1120)带轴附近 (b)(1100)带轴附近 (c)高分辨电子显微镜图像^[51]

因此,蓝宝石解理面和 GaN(1120)面能够很好地匹配,可以更容易地解理而形成激光器的谐振腔腔面.

生长在(0001)蓝宝石衬底上的(0001)GaN 薄膜,其方向关于衬底晶格旋转了 30°. 由于 $(0001)_{\text{GaN}} // (0001)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 $(1120)_{\text{GaN}} // (1\bar{1}00)_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, 所以沿 GaN(1120)方向,对(0001)和(1120)蓝宝石衬底来说,晶格均失配. 比较蓝宝石晶体沿(0002)和(1100)方向的原子距离可知,晶格失配从(0001)蓝宝石/GaN 情况下的 14% 增加到(1120)蓝宝石/GaN 的 21%, 从而形成更高密度的反相边界和堆垛层错^[47]. 透射电镜图像(见图 19)已经证实这一点. 在 GaN/(1120)蓝宝石界面处,70 nm 宽的范围内,有很高的堆垛层错密度以及由于合拢而形成得位错和反相边界. 与此形成对比的是, GaN/(0001)蓝宝石只有 45 nm 宽^[49]. 这意味着在(1120)蓝宝石衬底上生长的 GaN,其无序的结晶层厚度比(0001)蓝宝石衬底上生长的 GaN 增加了很多,从而导致了较高的线性位错密度. 事实上,由透射电镜分析可知,相同条件下,在(1120)和(0001)蓝宝石上生长的样品的位错密度分别是 $6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,前者比后者高出一个数量级以上^[49, 50].

5 总结

这篇综合评述文章介绍了金属有机化学气相沉积物理

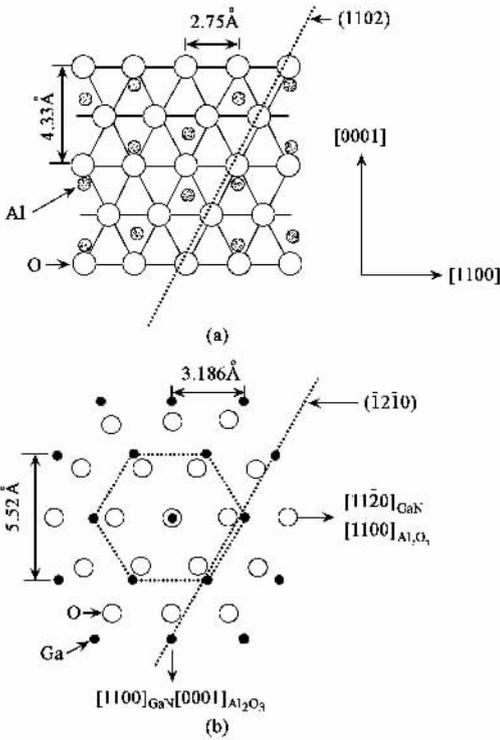


图 18 (a) (1102)蓝宝石原子排列投影图 (b) (0001) GaN 和 (1120)蓝宝石取向关系示意图^[51]

积外延技术生长的 III 族氮化物半导体的研究新进展,并特别介绍了 InGaN/GaN 多量子阱的光学特性研究新进展.金属有机化学气相沉积外延技术是许多实验室和公司用于生长材料和器件结构的主要方法,虽然最近十多年来在 GaN 晶体的生长技术和晶体的特性研究方面取得了长足的进步,但较其他 III-V 族化合物,比如 GaAs 而言,III 族氮化物晶体的质量仍然非常差,制备仍然相当困难.但就是如此差的材料,居然能制备如此多和如此性能优异的器件,很令人吃惊和让人感觉很幸运.这也意味着,III 族氮化物还需要作很多的研究,还有很多未知领域值得去探索.

致谢 本项工作得到日本德岛大学和英国谢菲尔德大学的支持,特此表示感谢.

参 考 文 献

[27] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama. J. Appl. Phys., 1997, 36 : L1568
 [28] Wang T, Parbrook P J, Whitehead M A *et al.* J. Cryst. Growth 2004, 273/1-2 : 48
 [29] Kozodoy P, Abare A, Sink R K *et al.* Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1997, 468 : 481

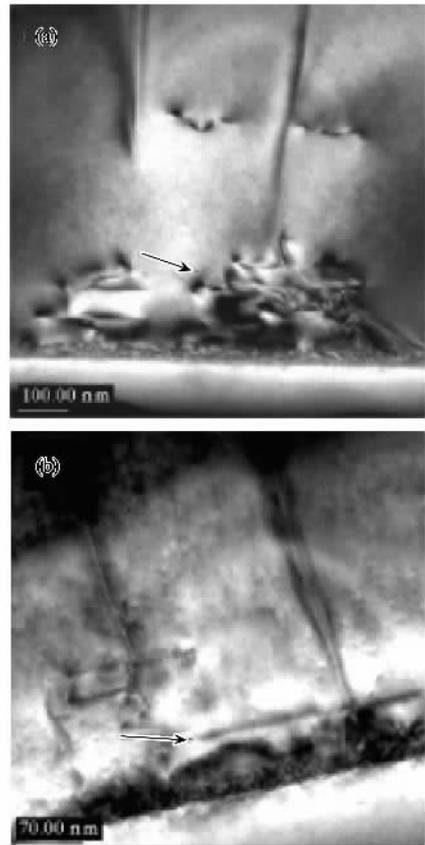


图 19 在 (1120) (a) 和 (0001) (b) 蓝宝石上生长的 GaN 在位于 GaN 和蓝宝石衬底附近的明场透射电镜图像,界面附近堆积无序层的厚度不同^[51]

[30] Fan W H, Olazola S M, Wang T *et al.* The 5th International conference on nitride semiconductors. A0118, Nara, Japan, May 25-30, 2003
 [31] Shapiro N A, Perlin P, Kisielowski C *et al.* MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 2000, 5 : 1
 [32] Ridley B K. Phys. Rev. B, 1990, 41 : 12190
 [33] Sun C K, Keller S, Chiu T C *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3 : 731
 [34] Wang T, Saeki H, Bai J *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 76 : 1737
 [35] Wang T *et al.* Journal of Crystal Growth, 2001, 224 : 5
 [36] Akasaki I, Sota S, Sakai H *et al.* Electron. Lett., 1996, 32 : 1105
 [37] Kneissl M, Bour D P, Johnson N M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 72 : 1539
 [38] Mack M, Abare A, Aizcorbe M *et al.* MRS Internet J. Nitride Semicond. Res., 1997, 2 : 41
 [39] Chichibu S, Azuhata T, Sota T *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69 : 188
 [40] Narukawa Y, Kawakami Y, Funato M *et al.* Phys. Rev. B, 1997, 55 : R1938
 [41] Statake A, Masmoto Y, Miyajima T *et al.* Phys. Rev. B, 1998, 57 : R2041
 [42] Crowell P A, Yong D K, Keller S *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 72 : 927
 [43] Doppalapudi D, Lliopoulos E, Basu S N *et al.* J. Appl. Phys., 1999, 85 : 3582

[44] Sun C K , Keller S , Chiu T C *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics ,1997 ,3 731

[45] Moustaks T D. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. ,1996 ,395 : 111

[46] Nakamura S , Chichibu S. Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes. London and New York :Taylor & Francis ,1999. Chap.5 ,174

[47] Bai J , Wang T , Sakai S. J. Cryst. Growth ,2001 223 61

[48] Kronberg M L. Acta Metall. ,1957 ,5 507

[49] Hao M , Sugahra T , Sato H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. ,1998 , 37 291

[50] Mahanty S , Hao M , Sugahara T *et al.* Materials Letters ,1999 , 41 67

[51] Bai J , Wang T , Li H D *et al.* Journal of Crystal Growth 2001 , 231 41

(全文完)

· 物理新闻和动态 ·

被探测到的地球中微子

中微子的量是很稀少的,它的质量和相互作用也是很小的,但在太阳内部,作为核聚变反应的副产品,它的数量却是很巨大的.由此可见,中微子是经常出现于核反应与宇宙射线簇射中.过去安置于地下的陆地探测器曾给出过各种中微子的记录.现在由于掌握了测定地球内部辐射衰变中电子反中微子的数量,从而开辟了中微子物理的一个新纪元.日本的 Kamioka 液体闪烁反中微子探测器(简称为 KamLand)可记录存在着的可供选择的各种不同能量的中微子.由于地球内部模型的不确定性,使测量数据不太精确,尽管如此,仍可确定有许多是地球中微子.这些中微子估计来自于 U-238 和 Th-232 的衰变,当中微子进入实验装备时就能被探测器测试到.地下能库的能量来自于两个方面:一个是地球在成型时残留下能量;另一个是由于一系列辐射衰变带来的附加能量,这些能量使地球保持着一定的热度,同时也支撑着地壳构造板块的运动.对地球中微子总量的测定基本上与理论的估算相符合.

(云中客 摘自 Nature 28 July 2005)



无锡市苏威试验设备有限公司

WUXI SUWEI TESTING EQUIPMENT CO., LTD.

苏威公司是一家集科研、设计及制造各类模拟气候环境试验设备的专业性企业。本公司现已通过 ISO 9001:2000 质量管理体系认证。产品有：适于作步入式恒温、高低温、高低温湿热、高低温交变湿热、恒定湿热、高温恒温、盐雾腐蚀、滴水淋雨、紫外灯(氙灯)耐气候、砂尘、霉菌、振动、跌落等各种试验的试验设备。

<http://www.wxsuwei.com>



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



YWX/Q-系列

盐雾腐蚀试验箱

地址：无锡市山北双河大庄 1 号
电话：0510-3019806(总机)
邮编：214037

销售热线：0510-3725132 3723557
传真：0510-3739455
手机：0-1390619778

北京办事处：010-68633994 13671120840
广州办事处：020-31398162 13640248003