

文章编号:1005-4642(2023)10-0027-08

基于表面光电电压谱的量子化能级测量

吴雅苹^{a,b,c,d},张纯森^{a,b,c,d},赵子锐^{a,b},孟 恺^{a,b},衣行健^{a,b},王一帆^{a,b},王新然^{a,b}
(厦门大学 a. 物理科学与技术学院;b. 微纳光电子材料与器件教育部工程研究中心;c. 厦门大学国家集成电路产教融合创新平台;d. 福建省半导体材料及应用重点实验室,福建 厦门 361005)

摘 要:量子结构材料与技术的前沿科学领域的应用日益广泛,量子化能级的探测与调控具有重要的教学与科研意义. 本文设计搭建基于表面光电电压效应的量子化能级测量装置,控制步进电机带动闪耀光栅旋转,将氙灯的复色光分解为单色光,并照射到 InGa_N/Ga_N 量子阱上,采集光电电压信号得到其表面光电电压扫描谱线,并结合光学偏振片、磁铁与控温装置等实现量子能级、自旋能级的探测以及能级的温度调控.

关键词:表面光电电压效应;量子化能级;InGa_N/Ga_N 量子阱;能级调控

中图分类号:O431.2

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.10.003

随着科学的发展和加工技术的进步,研究人员成功制备出了量子点、量子线、量子阱、光子晶体等人造量子结构,获得了固有能级以外的人工量子能级^[1]. 目前,量子结构材料与技术的前沿科学领域的应用日益广泛. 生物医学方面,量子点可与生物分子结合,实现非同位素标记生物分子的超灵敏检测;可与转铁蛋白共价交联,实现单色长期荧光标记观察^[2-3]. 信息方面,以量子计算和量子通信为代表的第二次量子革命兴起,量子技术因此获得了 2022 年的诺贝尔物理学奖. 量子科技与人类的联系日益紧密,观测与探索量子现象对提高学生的前沿科学技术认知,培养学生的学习和科研兴趣至关重要. 然而,量子科学的相关实验往往理论深奥、实验成本高、仪器操作复杂而不利于开展与推广. 弗兰克-赫兹实验验证了汞原子内量子能级的存在,是经典的量子物理实验. 该实验具有现象直观、易操作的优点,其理论诞生至今已逾百年,而随着量子科技的飞速发展,对该实验教学的前沿性与创新性提出了更高要求.

量子阱作为半导体光电转换器件的重要组成部分,广泛应用于照明、显示、能源、通信等领域. 认识量子阱能级,并实现其探测与调控具有

重要的教学与科研意义^[4]. 量子能级的探测方法有光致发光、回旋共振吸收、光电电压效应等^[5],其中表面光电电压效应法对样品不具有破坏性,不受基底或本体的影响,且相比于吸收光谱,表面光电电压对半导体表面及空间电荷区的光吸收测试更加灵敏且误差较小^[6].

本文设计了基于表面光电电压谱的量子化能级测量实验,实验装置具有真空、变温、偏振与测试(磁场条件下)功能,可实现量子阱等量子能级的精确测量与调控,并可拓展应用于半导体材料体系. 该实验融合了光学、电学、热学、光电转换、量子力学、半导体物理等方面的知识,展现了物理学科多样的形式与统一的本质. 目前,本实验作为研究型实验设计项目已获得全国大学生物理实验竞赛一等奖,并引入本校作为专门化实验(必修,8 课时)与开放性实验(选修,16 课时)的教学内容,分别面向物理系四年级全体本科生和三年级少部分本科生. 除了仪器装置的组装搭建、光路调节以外,专门化实验主要设置单组分 InGa_N/Ga_N 量子阱的量子能级测量和自旋量子能级测量等实验内容,而开放性实验的内容则主要为多组分 InGa_N/Ga_N 量子阱的量子能级测量及其温度调控. 该课程的设置充分利用了开放研究型实验平

收稿日期:2023-04-04;**修改日期:**2023-06-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 62274139);厦门大学 2021 年“课程思政”示范课程建设项目

作者简介:吴雅苹(1983-),女,福建漳州人,厦门大学物理科学与技术学院教授,博士,研究方向为半导体材料与器件物理. E-mail:ypwu@xmu.edu.cn

通信作者:张纯森(1985-),男,福州闽侯人,厦门大学物理科学与技术学院工程师,博士,研究方向为二维材料生长与表征. E-mail:zhangcm000@xmu.edu.cn

台,拓展了实践教学领域,丰富了教学内容,培养了学生的探究精神、创新能力和科研素养。

1 实验原理

1.1 量子阱中量子化能级及其光电电压测量原理

量子阱是由不同组分的半导体材料构成、具有明显量子限域效应的电子或空穴的势阱,其最基本的特征为:由于量子阱宽度的限制(通常与电子的德布罗意波长或电子的平均自由程相当或更小),导致载流子的波函数在一维方向上局域化,使得载流子量子态的态密度为与能量无关的常量^[7]。

对于量子阱中的量子限域效应可简单通过连续有效质量近似模型进行估算。在有效质量近似下求解薛定谔方程,势阱中电子的波函数 $\psi(x, y, z)$ 和能量 E 满足以下方程^[8]:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 \psi(x, y, z) + V(z)\psi(x, y, z) = E\psi(x, y, z), \quad (1)$$

式中,势能函数 $V(z)$ 与 x 和 y 无关,故可用分离变量法求解。令 $\psi(x, y, z) = \varphi(x, y)u(z)$, 代入式(1)得 $\varphi(x, y)$ 与 $u(z)$ 满足以下方程:

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi(x, y) = E_{xy} \varphi(x, y), \quad (2)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} + V(z)u(z) = E_z u(z), \quad (3)$$

其中, $E_{xy} + E_z = E$ 。

由式(2)解得 $\varphi(x, y) = \exp[i(k_x x + k_y y)]$, 对应的能量 $E_{xy} = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2)$; 同时解得电子在 z 方向的能量本征值为分立值 E_1, E_2, \dots, E_i 。因此,势阱中电子的能量为

$$E = E_z + E_{xy} = E_i + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2), \quad (4)$$

无限深势阱中的量子阱能级则可表示为

$$E_n(k_x, k_y) = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L_z^2} + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2), \quad (5)$$

$$\psi = \phi(z) \exp(ik_x x + ik_y y), \quad (6)$$

其中 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h 为普朗克常量; m^* 为载流子的有效质量;量子数 $n = 1, 2, \dots$; L_z 为限域维度。

由于量子阱在 z 方向的能量本征值为一系列的分立值,因而其在势阱中形成了类原子的分立能级。

在量子阱结构的表面光电电压测量中,可调波长单色光入射样品表面,当其能量与最高占据能级和最低非占据能级之间的能量匹配时,可激发电子跃迁,产生表面电势的变化,从而在样品的上下电极板之间产生相应的电压差异。如图 1 所示,其中激发光从样品表面垂直于量子阱方向入射量子阱中,激发量子阱产生光电电压信号。采集并记录这些随入射光波长变化的表面光电电压信号,便可获得稳态表面光电电压谱,其峰值波长对应量子阱中的量子化跃迁能量^[9]。

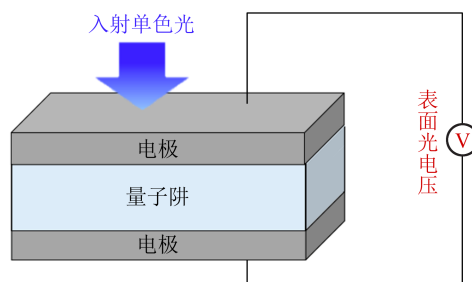


图 1 量子阱结构的表面光电电压测量方法示意图

1.2 量子阱中的自旋量子能级及其光电电压测量原理

由于自旋角动量的作用,量子阱的量子能级具有更精细的结构,即每个能级均包含自旋向上和自旋向下的本征态。自旋作为电子电荷之外的另一属性,为器件开发提供了新的自由度。

电子的自旋量子数为 $\frac{1}{2}$, 其自旋向上和自旋向下本征态的本征值分别为 $\frac{1}{2}\hbar$ 和 $-\frac{1}{2}\hbar$ 。在量子阱的分立能级中,非占据态电子不具有轨道角动量,其自旋角动量即为总角动量 $\pm \frac{1}{2}\hbar$ 。占据态电子具有本征值为 \hbar 的轨道角动量,再与其自旋角动量耦合,形成总角动量为 $\pm \frac{3}{2}\hbar$ 或 $\pm \frac{1}{2}\hbar$ 的量子能级,并在晶体场作用下劈裂为重空穴与轻空穴能级。

在跃迁过程中,光子和电子不仅交换能量,也交换动量和自旋,并且同时满足动量守恒与角动量守恒定理。光子和电子都具有明确定义的自旋,光子自旋本征态的本征值为 $+\hbar$ 和 $-\hbar$, 分别对应于左旋和右旋圆偏振光,线偏振光可以看作 2 束左旋和右旋圆偏振光的线性组合。当吸收了

1 个自旋为 $-h$ 的光子时,总角动量为 $\frac{3}{2}h$ 的电子可被激发为总角动量为 $\frac{1}{2}h$ 的电子. 因此,采用自旋本征值为 h 和 $-h$ 的左旋和右旋圆偏振光激发,可进一步探测精细的自旋量子能级^[10-11].

2 实验装置

为了测量量子阱的量子化能级和自旋量子能级,设计搭建了积木式、易操作、高精度的量子化能级测量装置. 该装置由可调波长单色光源模块、信号发生与调控模块和信号接收与检测模块 3 部分组成,如图 2 所示.

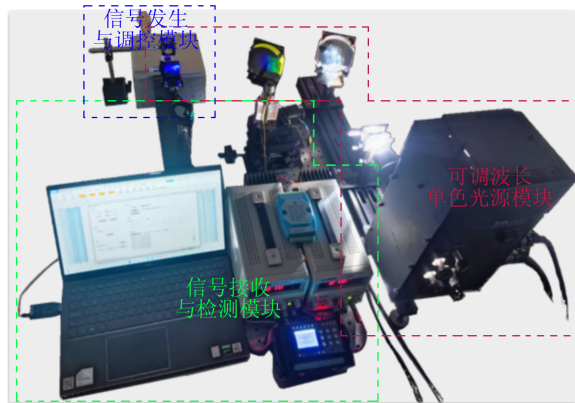


图 2 量子化能级测量装置实物图

2.1 可调波长单色光源模块

可调波长单色光源模块可实现对入射光波长的扫描,获得光电压强度与激发波长的依赖关系,并将氙灯发出的复色发散光转变为可调波长的单色光. 该模块由氙灯、氙灯电源、聚焦透镜、进光狭缝、准直物镜、成像物镜、反射镜、出光狭缝、闪耀光栅、步进电机及其驱动器构成,如图 3 所示.

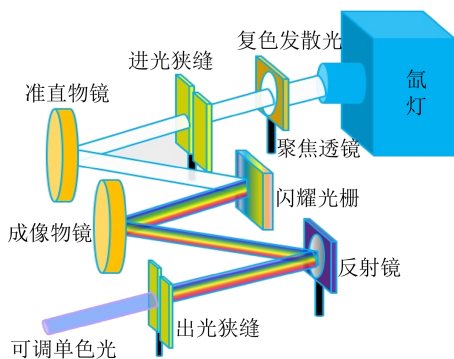


图 3 可调波长单色光源模块示意图

氙灯内装高压短弧球形灯泡,在高频电压激发下形成弧光放电,辐射出强而稳定、从紫外到近红外的连续光波;经聚焦透镜、进光狭缝和准直物镜的会聚、准直后,入射到刻线密度为 $1\ 800\ \text{mm}^{-1}$ 的闪耀光栅上,形成水平分布的彩色光带;不同波长的单色平行光经成像物镜和反射镜后会聚在成像物镜的焦点位置. 闪耀光栅放置于精密电动旋转平台上,并装配 42 型两相四线的步进电机,由配套控制器和驱动器控制,带动旋转平台(传动比为 1/90),用于调节闪耀光栅的角度. 因此,将出光狭缝固定在成像物镜的焦点位置,再通过步进电机转动闪耀光栅便可使不同波长的单色光从狭缝射出.

2.2 信号发生与调控模块

单色光从狭缝出射后,进入信号发生与调控模块. 该模块主要由 45° 反射镜、聚焦透镜、真空样品盒、真空泵、直型玻璃活塞、橡胶管、半导体制冷片、加热电阻丝、云母片、温差电偶、PID 温控仪、散热风扇、耐高温导线、线偏振片、 $1/4$ 波片、磁铁构成,可进行大气或真空环境中量子能级和自旋能级的探测与调控.

量子能级的测量光路如图 4 所示,单色光从狭缝出射后到达 45° 反射镜,光线的传播方向由水平转变为竖直向下. 下方真空样品盒采用具有电磁屏蔽功能的金属材料制成,预留密封处理的石英玻璃通光孔及引线端口;样品盒内通过橡胶管、直型玻璃活塞与真空泵相连,采用真空泵经由样品盒上预留的抽气口排出气体,可为样品提供真空测试环境. 入射光由透镜聚焦后经通光孔照射到盒内样品上,激发产生的表面光电压信号通过引线端口引出并接入电路中.

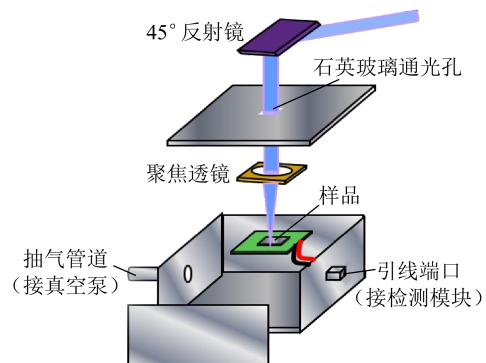


图 4 信号发生与调控模块示意图

若在入射光路中插入线偏振片和 1/4 波片, 单色光会转变为圆偏振光. 同时采用磁性电极收集产生的光电压信号, 并在样品盒内部装配磁铁以偏置电极的磁矩方向, 筛选出特定自旋的电子, 实现对精细自旋能级的探测^[10-11], 其光路如图 5 所示.

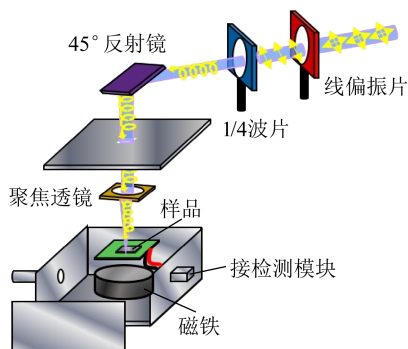


图 5 自旋量子能级探测部件示意图

此外, 结合真空与控温装置还可以测量并调控不同温度下的量子能级, 如图 6 所示. 在样品盒中装配镍铬合金电阻丝或半导体制冷片, 可实现样品的加热或制冷; 采用温差电偶、PID 温控仪可自动测量并控制样品的温度, 从而研究常温、高温以及低温条件下的量子能级.

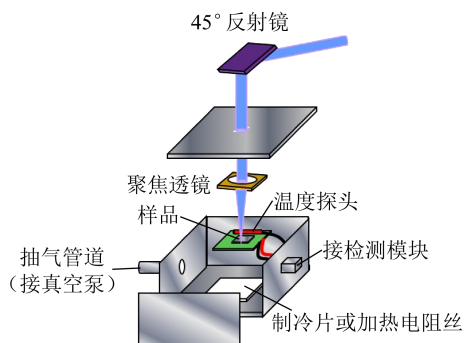
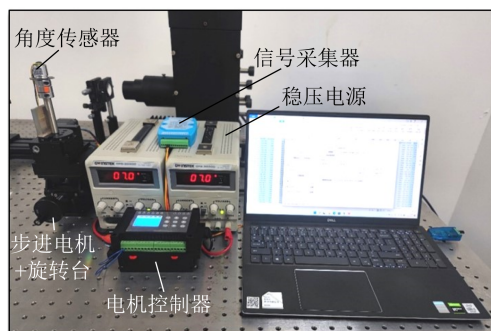


图 6 能级变温调控部件示意图

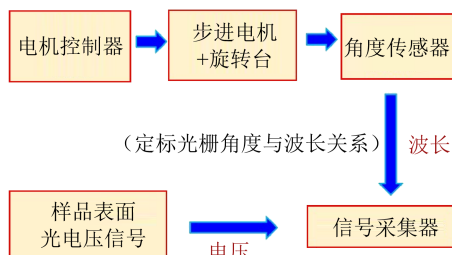
2.3 信号接收与检测模块

信号接收与检测模块主要由信号采集器、角度传感器、模块通信传感器和 24 V 稳压电源构成, 如图 7(a) 所示. 其中, 信号采集器的响应时间为 0.001 s, 通信更新速度 ≤ 10 Hz, 用于接收样品的表面光电压信号; 角度传感器的光电压探测灵敏度为 ± 1 mV, 探测范围为 14~5 000 mV, 用于采集闪耀光栅角度的模拟信号, 然后由信号采集

器转换成 2 路数字信号. 模块通信转换器将 USB 串口转换为 RS485 串口, 从而将电信号输入计算机, 得到光电压与波长的依赖关系, 其运行逻辑如图 7(b) 所示.



(a) 实物图



(b) 运行逻辑示意图

图 7 信号接收与检测模块

2.4 波长-角度定标

由闪耀光栅分出的单色光波长由光栅的旋转角度确定, 因此应定标波长与转角的关系. 定标过程如下:

1) 启动步进电机连续改变闪耀光栅的角度, 将用于校准的光纤光谱仪的光纤对准出光狭缝, 尽可能减小狭缝宽度以获得单色性较好的单色光;

2) 通过光谱仪读取单色光的波长, 同时用电脑端采集角度信号, 得到多组角度和波长的对应关系.

闪耀光栅 1 级闪耀波长公式为

$$\lambda_1 = 2d \cos(i+c) \sin \theta_b, \quad (7)$$

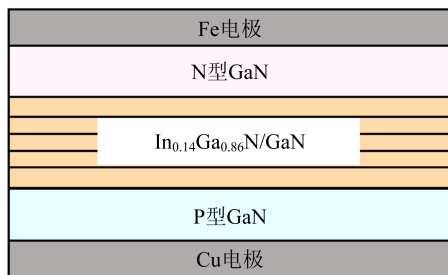
其中, λ_1 为 1 级闪耀波长, d 为闪耀光栅刻线间距, i 为入射角, c 为待标定常量, θ_b 为闪耀角. 定标时无需关心具体的 d 和 θ_b 值, 令 $A = 2d \sin \theta_b$, 式(7)可简化为

$$\lambda_1 = A \cos(i+c). \quad (8)$$

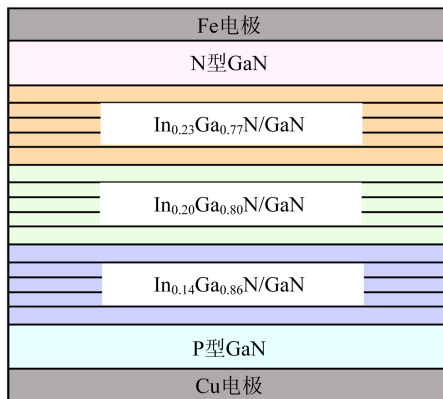
采用 Origin 的非线性函数工具拟合 i 和 λ 的对应曲线,得到常量 A 和 c 的值. 由于调节闪耀光栅角度的步进电机旋转步长约为 0.02° ,相应波长的步长约为 0.1 nm .

3 实验结果与分析

实验以单组分与多组分 InGaN/GaN 量子阱(企业定制)^[12]为例,测量了该量子阱量子化能级与自旋量子能级,并对其进行变温调控. InGaN/GaN 量子阱结构如图 8 所示^[13].



(a) 单组分子量子阱



(b) 多组分子量子阱

图 8 量子阱的结构示意图

量子阱结构主要由厚度约为 $2\ \mu\text{m}$ 的 Si 掺杂 N 型 GaN 和厚度为 220 nm 的 Mg 掺杂 P 型 GaN 薄膜,以及二者之间 5 个周期的 InGaN/GaN ($3\text{ nm}/1.5\text{ nm}$)超薄量子阱结构构成. 制备方法如下:

1) 采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 法在蓝宝石衬底上生长 N 型 GaN 薄膜,再生长 InGaN/GaN 超薄量子阱和 P 型 GaN 薄膜;

2) 外延生长完成后,通过金属键合技术将 P 型 GaN 薄膜上表面与金属 Cu 基板键合作为 P 型层电极;

3) 通过激光剥离技术将蓝宝石基底移除,暴露出 N 型 GaN 层,再通过电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 技术将 N 型 GaN 的厚度减小至约 $1\ \mu\text{m}$;

4) 通过磁控溅射技术沉积厚度约为 20 nm 的 Fe 超薄金属薄膜作为 N 型层电极,并在 Fe 电极表面沉积 5 nm 的 Au 保护层以防止 Fe 电极在空气中被氧化.

超薄金属薄膜电极具有高透射率和良好的导电性,保证了入射光可照射到量子阱中. 该结构中 GaN 作为量子的阱势垒层,而不同组分的 In-GaN 作为量子阱的势阱层,电子跃迁的能量取决于 InGaN 势阱中占据能级与非占据能级之间的能量差^[14].

单组分量子阱由多对超薄 $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}/\text{GaN}$ 结构构成,势阱中最高占据能级与最低非占据能级之间的能量差为: $E_{\text{标}} = 3.106\text{ eV}$. 多组分结构中包含 $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}/\text{GaN}$, $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}/\text{GaN}$ 和 $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}/\text{GaN}$ 3 种量子阱材料组分,这些组分对应的最高占据能级与最低非占据能级之间的能量差分别为: $E_{1\text{标}} = 3.106\text{ eV}$, $E_{2\text{标}} = 2.980\text{ eV}$ 和 $E_{3\text{标}} = 2.917\text{ eV}$. 后续误差计算中可将实验值与该标称值对比分析.

3.1 单组分 InGaN/GaN 量子阱的量子能级测量

首先测量了单组分子量子阱在室温下的表面光电压谱,如图 9 所示,扫描范围为 $350\sim 500\text{ nm}$. 可以看到在波长 $\lambda = 404.5\text{ nm}$ 处出现明显谱峰,且峰位两侧电压值迅速衰减,表明该峰为量子化的非连续跃迁峰,由 $E = \frac{hc}{\lambda}$ 计算可得其跃迁能量 $E = 3.071\text{ eV}$,与标称值偏差 $U \approx 1.0\%$,表明该测试准确性较好且精度较高.

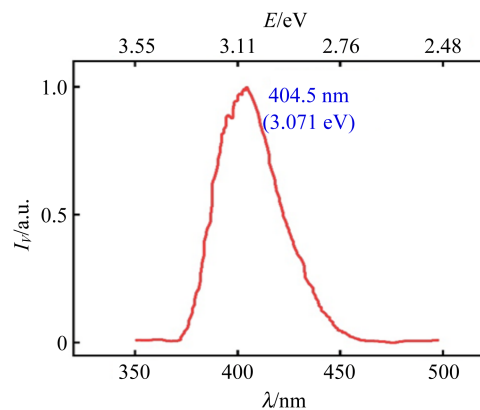


图 9 单组分 InGaN/GaN 量子阱的光电压谱

为对比光电压谱与传统的光致发光(PL)谱测试结果的差异,进一步采用 325 nm 激光对单组分 $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱进行 PL 光谱表征,结果如图 10 所示. 可以看出:样品在 360~450 nm 范围内出现了明显的 PL 峰,其最高峰值位于约 404.0 nm 处,与光电压谱测得的峰位波长基本一致. 然而 PL 信号与光电压信号相比,其峰形明显展宽且不对称,半高全宽约为 45 nm,显著大于光电压谱的测试结果(25 nm),这可能是由于材料结构中不可避免的晶格应力、缺陷能级等因素导致的谱峰展宽. 由于光激发电子空穴对的寿命较短,电子空穴的辐射复合过程往往较快,因此晶格应力、缺陷能级等引起的 PL 信号较为明显,在一定程度上对原本量子化能级的测量产生干扰,导致其峰位的叠加和展宽. 相比之下,光电压谱的测量过程是基于光生伏特效应,其探测对象主要为空间分离电子和空穴. 材料结构中由晶格应力、缺陷能级等因素所引起的额外能级往往波长较短且能量较小,相对易于发生复合,而不易收集产生的光电压. 由此证明通过光电压谱测试方法,可以有效地探测材料的量子化能级,抑制其他因素带来的干扰信号^[6].

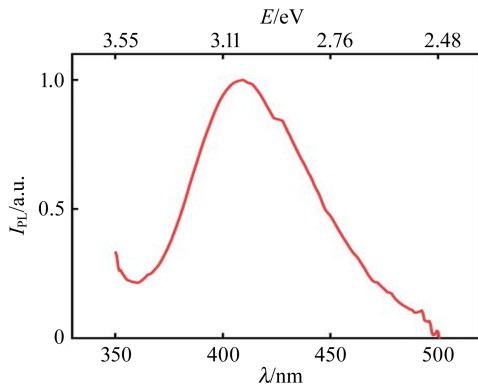


图 10 单组分 InGaN/GaN 量子阱 PL 光谱

3.2 单组分 InGaN/GaN 量子阱的自旋量子能级测量

对于精细自旋量子能级探测,在磁场(约为 0.55 T)调控下,通过左旋(σ^-)和右旋(σ^+)圆偏振光照射样品,得到图 11 所示 2 条光电压谱线.

尽管 2 条谱线的峰位几乎重合,但其峰强差异明显,分别对应于自旋向上和自旋向下的量子能级跃迁. 根据自旋极化率公式计算可得^[15]:

$$\rho = \frac{I_{V+} - I_{V-}}{I_{V+} + I_{V-}} = \frac{1 - 0.85}{1 + 0.85} \approx 8.1\%$$

该结果与文献[10]采用的电致发光法测得的极化率结果相近,证明该实验装置成功实现了自旋能级精细结构的探测.

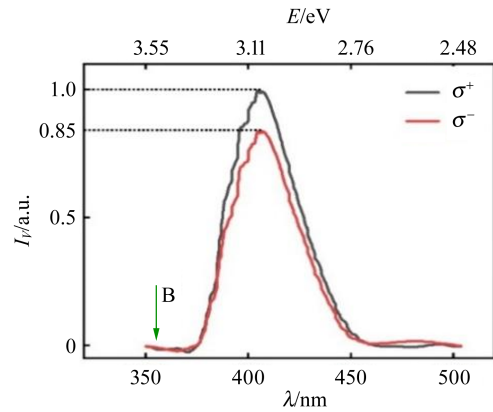


图 11 单组分 InGaN/GaN 量子阱自旋向上和自旋向下的光电压谱

3.3 多组分 InGaN/GaN 量子阱的量子能级测量及其温度调控

对于多组分 InGaN/GaN 量子阱结构,首先测量了其在室温(25 °C)与 140 °C 下的光电压谱,如图 12 所示. 可以看出:多组分量子阱的谱线与单组分结构相比有所展宽,且相对常温谱线高温谱线呈现出明显的红移现象,测得最大红移波长约为 10 nm. 该红移现象源自温度对吸收边能量位置的影响,首先是热膨胀,即温度导致晶格常量变化引起带边的移动;其次是温度引起的晶格振动状态的变化,导致电子声子耦合,引起能级位置的移动.

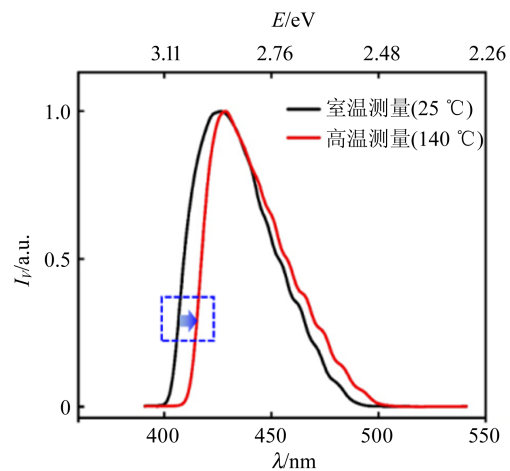


图 12 多组分 InGaN/GaN 量子阱在室温(25 °C)与 140 °C 下的光电压谱

为了区分多组分量子阱中的各量子化能级,进一步对其进行低温($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)光电电压谱的探测.测试过程中,采用真空样品盒配合真空泵使样品处于真空环境,并且在样品背面粘贴半导体制冷片,对样品进行制冷,并由温差电偶测量其温度.测量结果与常温光电电压谱线对比曲线如图 13 所示.低温谱线相比常温谱线表现出了更明显的不对称性,且 3 种组分对应的峰位已可分辨,如图 14 所示.

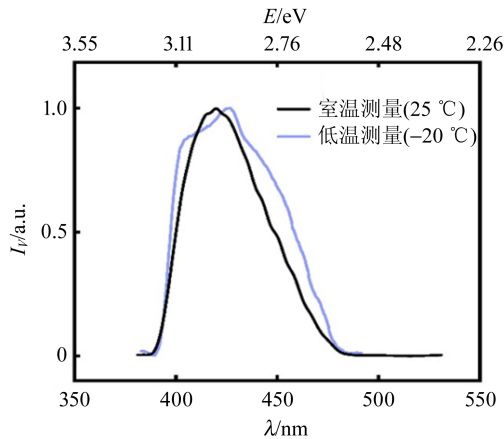


图 13 多组分 InGaN/GaN 量子阱室温和低温的光电压谱

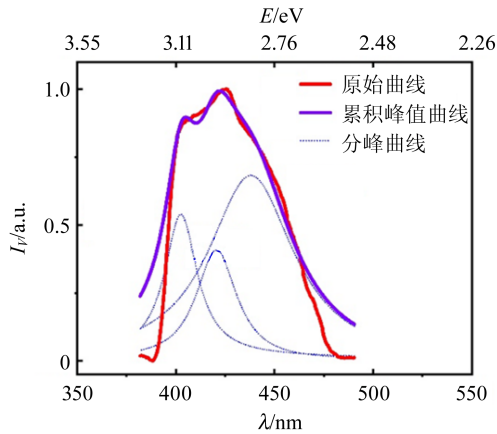


图 14 多组分 InGaN/GaN 量子阱低温光电电压谱及其分峰曲线

图 14 的分峰结果显示:样品 $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}/\text{GaN}$, $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}/\text{GaN}$, $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}/\text{GaN}$ 的峰位波长分别为 402.5 nm , 420.5 nm 和 438.0 nm , 再根据 $E = \frac{hc}{\lambda}$ 计算得到对应的量子化跃迁能量分别为: $E_1 \approx 3.087\text{ eV}$, $E_2 \approx 2.955\text{ eV}$ 和 $E_3 \approx 2.836\text{ eV}$. 与该多组分量子阱标称值对比,相对

偏差分别为: $U_1 \approx 0.6\%$, $U_2 \approx 0.8\%$, $U_3 \approx 2.8\%$, 表明该测量结果具有良好的能量分辨,实现了变温条件下对量子化能级的调控.

4 结束语

本文利用自主设计搭建的量子化能级测量实验装置,基于表面光电压法实现了 InGaN/GaN 量子阱量子能级与自旋精细能级的高精度探测;通过温度调控研究了能级的红移现象,并在低温下分辨出多量子阱中各组分的量子化能级.该实验解决了量子化能级测量难以开展实验教学的问题.实验装置由分立元件构成,打破黑盒子,直观地展示物理过程.实验具有良好的开放性和拓展性,可施加力、热、光、电、磁进行多场调控,探索不同材料体系丰富的物理性质,并涉及到光学、电学、热学、光电转换、量子力学、半导体物理等诸多领域,兼具教学与科研功能.该实验与前沿科技紧密结合,加深了学生对半导体、量子、自旋等知识的理解,培养了学生的自主设计与探索能力,同时使学生深刻体验科学探究过程,提高学生的创新精神和科学素养.

参考文献:

- [1] 王占国. 半导体材料研究的新进展[C]//国外材料科学与工程发展动向研讨会论文集. 大连:中国材料研究学会,2001.
- [2] Chan W C W, Nie S M. Quantum dots bioconjugates for ultrasensitive nonisotopic detection [J]. Science, 1998,281(5385):2016-2018.
- [3] 宋国龙,孔祥东. 量子点作为荧光探针在生物医学领域的研究进展[J]. 纳米技术,2016,6(1):9-13.
- [4] 刘柱,赵志飞,郭浩民,等. InAs/GaSb 量子阱的能带结构及光吸收[J]. 物理学报,2012,61(21):413-419.
- [5] 冯端. 固体物理学大辞典[M]. 北京:高等教育出版社,1995:2.
- [6] Lagowski J, Balestra C L, Gatos H C. Photovoltage inversion effect and its application to semiconductor surface studies: CdS [J]. Surface Science, 1971,27(3):547-558.
- [7] 戈君,肖景林. 各向异性抛物势对非对称半指数量子阱中杂质极化子基态能量的影响[J]. 原子与分子物理学报,2023,40(2):25-30.
- [8] 彭英才,赵新为,傅广生. 低维半导体物理[M]. 北京:国防工业出版社,2011:6.

- [9] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学 [M]. 7 版. 北京:电子工业出版社,2008:5-7.
- [10] 曾晓琳. 半导体二维电子气及三维拓扑绝缘体的圆偏振光致电流研究[D]. 福州:福州大学,2018:11-14.
- [11] 杨春雷,王建农,葛惟锟,等. 自旋光电流与电流诱导的电子自旋极化[J]. 物理,2007(1):7-10.
- [12] 蒋成伟. 面向可见光通信的硅基 InGa_N/Ga_N 多量子阱光子集成芯片[D]. 南京:南京邮电大学,2023:8-16.
- [13] 王新强,康俊杰,罗巍,等. In-Si 共掺杂量子阱的 AlGa_N 基深紫外 LED 外延结构及其制备方法 [P]. CN113838951A, 2021-12-24:17-18.
- [14] 林琦,林中晞,赵晓凡,等. 一种半导体量子阱激光器及其制备方法 [P]. CN113708219A, 2021-11-26:2.
- [15] Song A K, Chen J J, Lan J S, et al. Modulating room temperature spin injection into GaN towards the high efficiency spin-light emitting diodes [J]. Applied Physics Express, 2020,13(4):043006.

Measuring quantized energy levels based on surface photovoltage spectra

WU Yaping^{a,b,c,d}, ZHANG Chunmiao^{a,b,c,d}, ZHAO Zirui^{a,b}, MENG Kai^{a,b},
YI Xingjian^{a,b}, WANG Yifan^{a,b}, WANG Xinran^{a,b}

(a. College of Physical Science and Technology; b. Engineering Research Center for Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices at Education Ministry; c. National Integrated Circuit Production and Teaching Integration Innovation Platform of Xiamen University; d. Key Laboratory of Semiconductors and Applications of Fujian Province, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The application of quantum structural materials and technology in frontier science is increasingly extensive. The detection and control of quantized energy levels is of great significance in teaching and scientific research. Here, a quantized energy level measuring device based on surface photovoltage spectrum scanning was designed and built. A stepping motor was programmed to drive the blazed grating to rotate and decompose the xenon lamp from polychromatic into monochromatic light. The monochromatic light irradiated onto InGa_N/Ga_N quantum well to generate the surface photovoltage signal which was collected by scanning the wavelength of the incident light. Further combining with optical polarizers, magnet and temperature controller, the quantum energy level and spin energy level were both detected, and the thermal regulation was also realized.

Key words: surface photovoltage effect; quantized energy level; InGa_N/Ga_N quantum well; energy level regulation

[编辑:龙玉梅]