

激光与光电子学进展

PbS 胶体量子点薄膜的光载流子辐射特性研究

雒东辉, 王谦*, 赵子涛

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 胶体量子点材料在太阳能电池和光电探测器等光电器件中有广泛的应用。利用光载流子辐射技术分析了 PbS 胶体量子点薄膜中含陷阱态时的激子输运状态。建立了不考虑量子点间净载流子传输的理论模型, 针对载流子的复合特性对光载流子辐射信号的影响进行了仿真。最后通过激发功率相关的频率扫描光载流子辐射实验, 并结合建立的激子输运模型, 提取了有效激子寿命、载流子俘获率、退俘获寿命等参数, 证实了理论模型的有效性。

关键词 量子点薄膜; 载流子复合; 陷阱态; 光载流子辐射

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231484

Photocarrier Radiometry Characteristics of PbS Colloidal Quantum Dot Films

Luo Donghui, Wang Qian*, Zhao Zitao

School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Colloidal quantum dot materials have pertinent applications in optoelectronic devices such as solar cells and photodetectors. Photocarrier radiometry technology is used to determine the exciton transport characteristics of a PbS colloidal quantum dot film containing trap states. A theoretical model ignoring net carrier transport between quantum dots is established, and the effects of exciton transport characteristics on photocarrier radiometry signals are subsequently simulated and analyzed. Finally, by conducting a frequency sweeping photocarrier radiometry experiment with different excitation powers, combined with the established exciton transport model, a variety of material parameters such as the effective exciton lifetime, carrier capture rate, and decapture lifetime are extracted. The experimental results confirm the validity of the proposed theoretical model.

Key words quantum dot films; carrier recombination; trap states; photocarrier radiometry

1 引言

胶体量子点 (Colloidal quantum dot, CQD) 具有带隙大小可调、合成简便、单分散性强、溶液处理能力强等特点, 在光伏器件中有着广阔的应用前景^[1-10]。同时量子点也被应用于各行各业, 如传感器领域、生物学和医学等。

由于载流子的复合特性与材料缺陷密切相关, 为了优化光电器件性能, 需要深入理解薄膜材料中包括激子、自由电子和空穴在内的载流子复合行为。常用的半导体材料特性表征方法有 X 射线衍射仪 (XRD)、电流-电压法、光致发光 (PL) 技术等。XRD 通过测得的图谱来获取衍射峰, 根据角度和相对强度来分析晶体结构。Bozyigit 等^[10] 和 Istrate 等^[11] 使用依赖温度的电流-电压研究了 PbS 纳米晶体二极管, 并建立了在不同纳米晶体中载流子传输、俘获和复合的系统模型。

研究发现量子点中的载流子输运是由扩散控制的陷阱辅助复合过程来实现的。考虑到电极制作等过程会对被测薄膜材料产生一定损伤, 引入额外的界面缺陷, 因此必须对其进行光学非接触无损检测。PL 技术常用于半导体材料中的缺陷检测, 如用于分析缺陷的能级结构的低温 PL 谱、用于计算载流子有效寿命的时间分辨 PL 技术等, 其中时间分辨 PL 技术由于测量误差较大, 难以精确获取激子的弛豫特性^[12]。

光载流子辐射 (Photocarrier radiometry, PCR) 是一种基于锁相技术的动态 PL 检测技术, 具有信噪比大、测量精度高等优点, 该技术自提出以来, 已建立了完备的基础理论和实验系统^[13-14]。PCR 使用调制激光激发样品产生过剩载流子, 并采用锁相放大技术解调探测器接收到的近红外辐射信号, 从而定量表征载流子的输运参数。与光热辐射 (PTR) 技术^[15] 相比, 光载流子的辐射信号仅与载流子的辐射复合过程相关, 不受热

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-06-21; 录用日期: 2023-06-28; 网络首发日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61704132)、陕西省自然科学基金基础研究项目 (2020JQ-815)、陕西高校青年创新团队

通信作者: *qianwang@xatu.edu.cn

辐射的影响,且涉及的拟合参数较少,测量精度较高。PCR技术自提出后被广泛应用于半导体材料参数的检测,如缺陷能级检测、载流子输运参数检测等^[16]。

本文基于 PCR 技术对常用于光伏器件和光电探测器件的 PbS-CQD 薄膜中载流子复合过程进行了研究。首先建立了适用于弱耦合 CQD 薄膜的简化 PCR 理论模型,并进行仿真分析;然后通过不同功率激光激发的频率扫描实验,对载流子的复合特性进行了定量分析;最后通过 PCR 信号的空间分布对薄膜的均匀性进行了分析。

2 理论建模

2.1 PbS CQDs 的载流子复合机制

对于 CQD 薄膜,表面悬空键造成的结构缺陷在很

大程度上会影响薄膜的质量,同时对相关光电器件的性能也有很大的影响。在 PbS 量子点中,潜在的点缺陷包括 Pb-空位 (V_{Pb})、S-空位 (V_S)、Pb-间隙 (Pb_i)、S-间隙 (S_i) 和反位点 (Pb_S 和 S_{Pb}) 等,上述缺陷主要在薄膜制造过程中引入,可以作为载流子的复合中心。

如图 1 所示,量子点薄膜中发生的复合途径主要有以下几个部分:自由激子辐射复合 (FE)、施主 A-受主 D 束缚激子辐射复合 (AX, DX),施主受主对非辐射复合 (DA),自由电子和中性受主的复合 (eA),自由空穴和中性施主的辐射复合 (hD)。上述复合过程不仅出现在传统半导体材料中,也存在于一些低维纳米材料中,如 ZnO 纳米晶体^[17],单层 MoS_2 、 $MoSe_2$ 和 WSe_2 薄膜^[18], ZnSe 纳米线^[19], $InGaN/GaN$ ^[20]、 $InAs/GaAsSb$ ^[21] 和 PbS 量子点^[22] 等。

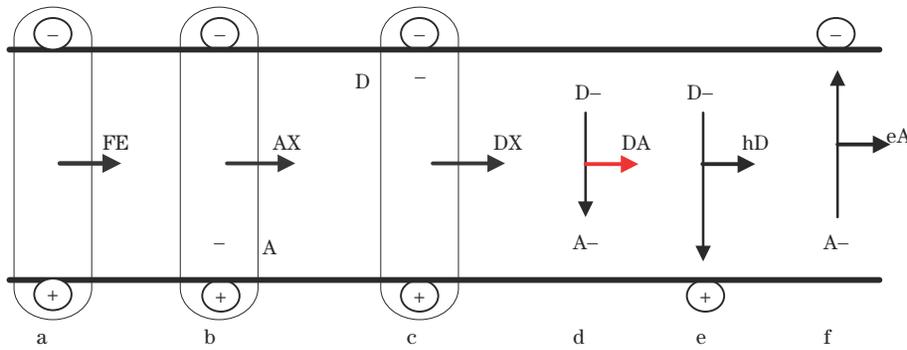


图 1 量子点薄膜中的复合途径。(a)自由激子复合;(b)受主 A 束缚的激子复合;(c)施主 D 束缚的激子复合;(d)施主受主对复合;(e)自由空穴与中性施主复合;(f)自由电子与中性受主复合

Fig. 1 Recombination pathways in quantum dot films. (a) Free exciton recombination; (b) exciton complex bound by acceptor A; (c) exciton complex bound by donor D; (d) donor-acceptor pair recombination; (e) free hole and neutral donor recombination; (f) free electron and neutral acceptor recombination

2.2 光载流子辐射理论

图 2 为 CQD 中的光激发载流子的产生、解离、跳跃传输和陷阱俘获过程的示意图。 S_e 和 S_h 分别为电子和空穴的基态; $E_{a,1}$ 和 $E_{a,2}$ 分别为与激子结合能 (E_b) 和通过陷阱进行跃迁相关的活化能; E_g 和 $E_{g,opt}$ 分别为

电子和光学带隙能量。当薄膜被激光激发时,激子先在 CQD 内产生,再通过多种传输机制进行扩散,在此过程中,激子可能解离成自由载流子。这些粒子、激子及其解离的载流子都可以通过辐射复合,或被束缚在陷阱态并以辐射或非辐射的方式复合掉。

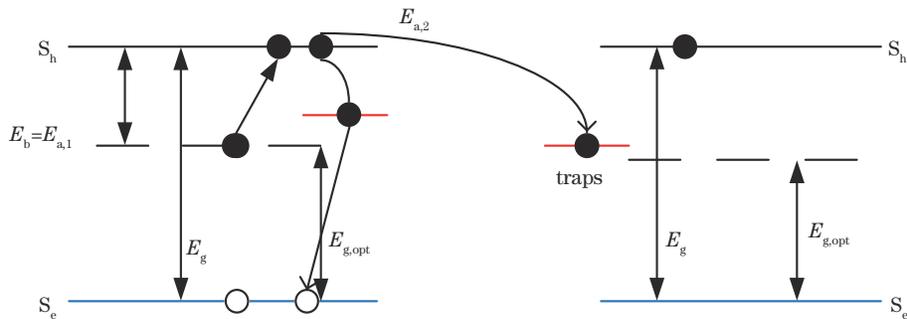


图 2 CQD 中的载流子产生、解离、跳跃和陷阱俘获过程

Fig. 2 Carrier generation, dissociation, jumping, and trap capture in CQD

对于 CQD 薄膜,量子点 i 中的载流子浓度 $N_i(x, t)$ 与量子点表面的陷阱态有关,如被陷阱中心俘获及陷阱俘获载流子的热发射等。对于长链有机配

体的量子点薄膜,量子点间的耦合效应比较弱,同时由于量子点薄膜厚度常在纳米量级,在吸收光子后载流子的纵向分布可以近似为均匀分布,因此在理论模型

中可以不考虑量子点间的净载流子传输,只分析量子点内的载流子复合过程,包括表面陷阱态对其的影响。此时,载流子速率方程^[23]可以表示为

$$\sum_{k=1}^m \left\{ e_{ik}(T) n_{Tk}(x, t) - C_{ik} N_i(x, t) [N_{Tk} - n_{Tk}(x, t)] \right\} - \frac{\partial N_i(x, t)}{\partial t} = \frac{N_i(x, t)}{\tau_{\text{eff}}} + G_0(x, t), \quad (1)$$

式中: k 表示陷阱能级; e_{ik} 表示陷阱能级 k 的热发射率; N_{Tk} 和 n_{Tk} 表示能级 k 的陷阱浓度和被该陷阱俘获的载流子浓度; $C_{ik} N_{Tk}$ 为两项的乘积,表示载流子俘获率; G_0 表示光载流子产生率; τ_{eff} 表示激子的有效寿命。在CQD薄膜中,所有不同能级的陷阱态都会对载流子传输行为产生相同的影响,即俘获和退俘获载流子。为了简化处理,将陷阱能级结构简化为单一有效陷阱能级。因此,载流子的速率方程可以简化为

$$\frac{\partial N_i(x, t)}{\partial t} = e_i(T) n_T(x, t) - C_i N_i(x, t) [N_T - n_T(x, t)] - \frac{N_i(x, t)}{\tau_{\text{eff}}} + G_0(x, t). \quad (2)$$

由于被俘获的载流子能从陷阱态释放或重新俘获,因此被陷阱俘获的载流子动力学方程为

$$\frac{\partial n_T(x, t)}{\partial t} = -e_i(T) n_T(x, t) - C_i N_i(x, t) [N_T - n_T(x, t)]. \quad (3)$$

PbS量子点中载流子存在亮态(或单线态)和暗态(或三重态),其浓度分别记为 $N_s(x, t)$ 和 $N_i(x, t)$,量子点中总的载流子浓度为 $N_i(x, t) = N_s(x, t) + N_i(x, t)$,因此

$$\frac{\partial N_i(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial N_s(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial N_i(x, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

由于单线态和三重态之间^[24]满足

$$N_s(x, t) = R_{\text{st}} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) N_i(x, t), \quad (5)$$

式中: ΔE 为两个能级之间的能级差; R_{st} 为能级简并常

数,此处大小为 $1/3$; k_B 为玻尔兹曼常数。为了简化,令

$$A(T) = R_{\text{st}} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right), \quad (6)$$

由式(4)~(6)可以得到

$$N_i(x, t) = (1 + A) N_i(x, t), \quad (7)$$

最后,可以得到总的速率方程为

$$\left(i\omega - \frac{C_i N_T}{1 + i\omega\tau_i} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} + C_i N_T\right) N_i(\omega) = \frac{G_0(\omega)}{1 + A}, \quad (8)$$

式中: $C_i N_i = R_T$, R_T 为陷阱退俘获率; τ_i 为陷阱俘获寿命; ω 为调制角频率(频域)。

由于光载流子辐射信号与探测区域内总的载流子浓度成正比,CQD薄膜的PCR信号^[25]可以表示为

$$S(\omega) = F \sum_{i=1}^N N_i(\omega), \quad (9)$$

式中: N 为探测区域内量子点数量; F 为比例系数,与信号的收集效率和近红外探测器的光谱探测带宽有关。最终的光载流子辐射信号可以表示为

$$S(\omega) = F k_2 / k_1, \quad (10)$$

其中, k_1 和 k_2 分别为

$$k_1 = i\omega - \frac{R_T}{1 + i\omega\tau_i} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} + R_T, \quad (11)$$

$$k_2 = G_0(\omega). \quad (12)$$

3 仿真分析

仿真中,所有参数设置如下:激子有效寿命 $\tau_{\text{eff}} = 100 \mu\text{s}$;能级差 $\Delta E = 25 \text{ meV}$;陷阱俘获寿命 $\tau_i = 10 \text{ ns}$;陷阱退俘获率 $R_T = 10^9 \text{ s}^{-1}$;产生率 $G_0 = 5 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2}/\text{s}$ 。

图3给出了有效寿命值从 $10^{-4} \mu\text{s}$ 变化到 $1 \mu\text{s}$ 时PCR信号振幅和相位的变化情况。如图3所示,PCR振幅随有效寿命的增大而增大,相位随有效寿命的增大而减小。在低频区域,当激子寿命小于调制周期时,整个PCR的振幅和相位信号均变化不大。在高频区域,尤其是当激子寿命大于调制周期时,每个调制周期内激子的复合过程并不完整,因此,PCR振幅随着频率升高逐渐减小,相位的滞后也更加明显。进一步分析有效寿命的影响,当有效寿命低于 $10^{-2} \mu\text{s}$ 时,由于

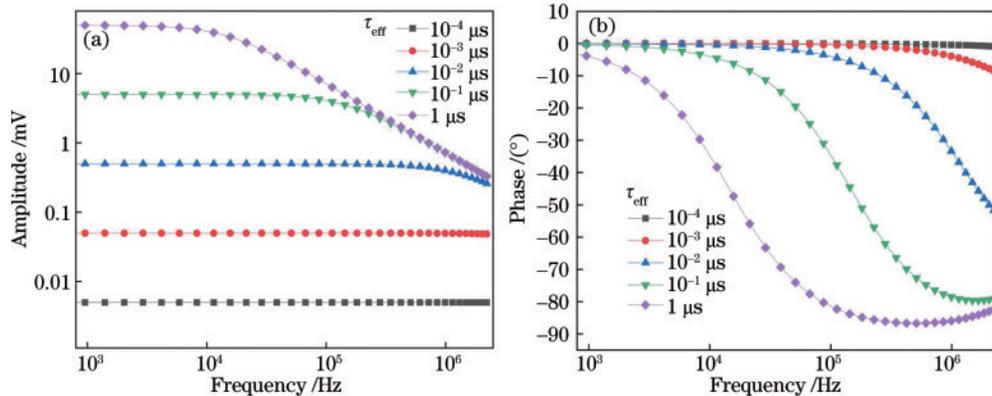


图3 有效寿命对PCR信号的影响。(a)振幅;(b)相位

Fig. 3 Effect of effective lifetime on PCR signal. (a) Amplitude; (b) phase

激子存在时间短,在整个频率扫描范围内 PCR 振幅基本保持不变,PCR 相位在高频区域有所减小,表明实验中难以通过低频信号来获取准确的激子有效寿命。随着有效寿命的增大,PCR 振幅和相位在整个频率扫描范围内均出现明显变化,如低频区域的振幅信号和 高频区域的相位信号。值得注意的是,当有效寿命增大至 $10^{-1} \mu\text{s}$ 时,相位信号随频率增大出现先减小后增大的现象。

图 4 所示为陷阱俘获寿命从 0.1 ns 变化到 1000 ns 时 PCR 信号的变化情况。由图中分析来看,低频时

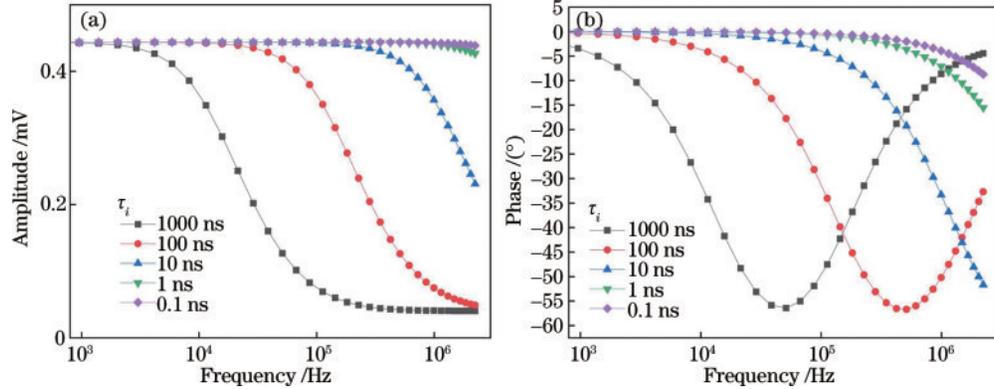


图 4 陷阱俘获寿命对 PCR 信号的影响。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 4 Effect of trap capture lifetime on PCR signal. (a) Amplitude; (b) phase

图 5 所示为陷阱退俘获率从 10^8 s^{-1} 到 $3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 时 PCR 的振幅和相位变化情况,可以看出陷阱退俘获率对信号影响很大。在处于低频时,陷阱退俘获率对振幅和相位的影响较小,信号基本保持不变。当频率增大至 10^5 Hz 时,振幅和相位均随调制频率增大而减小,减小的程度与陷阱的退俘获率有关,退俘获率越大,振

PCR 振幅和相位受陷阱俘获寿命的影响较小。随着调制频率的增大,俘获寿命对振幅和相位的影响显著增大。首先,PCR 振幅随着调制频率的增大逐渐减小,尤其对于高陷阱俘获寿命的情况,振幅变化更加明显。其次,对于相位信号,在图 4(b) 所给的频率范围内,当陷阱俘获寿命较低时,相位随频率增大逐渐减小,与振幅变化一致。当陷阱俘获寿命大于 100 ns 时,PCR 相位出现先减小后增大的现象,与图 3(b) 中高激子有效寿命的情况类似,该现象可能是受量子点表面陷阱及激子有效寿命的综合影响。

幅和相位的减小越明显。

上述仿真结果表明,不同输运参数均会对 PCR 信号产生影响,且影响程度和影响频率区域等各不相同,因此通过多参数拟合实验,测量样品在不同调制频率时的 PCR 振幅和相位变化曲线,可以得到半导体的输运参数值。

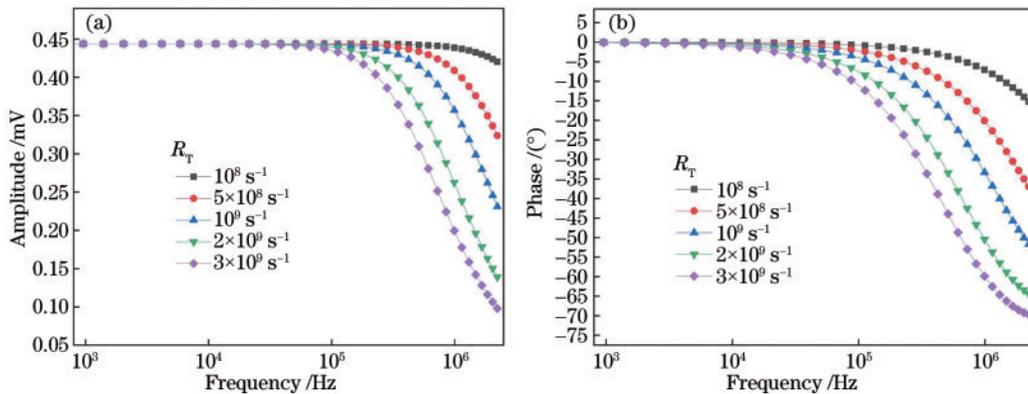


图 5 陷阱退俘获率对 PCR 信号的影响。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 5 Effect of trap decapture rate on PCR signal. (a) Amplitude; (b) phase

4 实验与结果讨论

图 6 为 PCR 技术的实验装置示意图。使用波长为 405 nm 的二极管激光器作为激励光源,其输出光强由函数发生器进行周期性方波调制,激光器输出光束经过反射镜反射后照射到 PbS-CQD 薄膜表面,光

束激发产生的载流子经辐射复合后辐射出近红外光子,辐射光子被一对抛物面镜收集,并由 InGaAs 光电探测器(响应波长范围为 800~1700 nm,带宽为 11 MHz)探测,最后经锁相放大器解调后输出 PCR 信号的振幅和相位,整个过程通过计算机进行控制和数据存储。

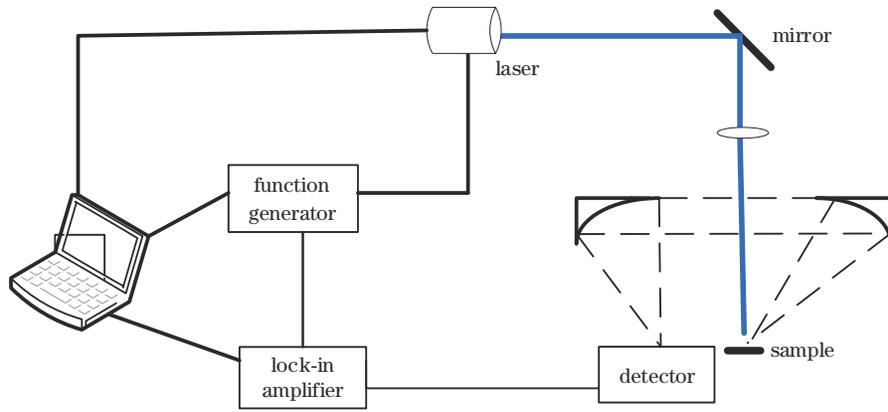


图 6 光载流子辐射技术的实验装置

Fig. 6 Experimental device of optical carrier radiation technique

实验中,激光器的频率扫描范围为 1000 Hz~1 MHz,扫描点数为 21 个,每一步的时间间隔为 3 s,锁相放大器的积分时间设为 1 s,在每个频率点上锁相放大器对 PCR 信号进行多次读数,最后输出和保存的 PCR 信号为其多次测量结果的平均值。本文研究的 CQD 薄膜是用 20 mg/mL 的 PbS 溶液以转速 3000 r/min 旋涂 30 s;再用体积分数为 1% 的乙二硫醇(EDT)滴在表面,静置 30 s;再用异丙醇(IPA)来清洗配体;最后重复

上述步骤 9 次,制备厚度为 200 nm。

图 7 为不同功率的 PCR 振幅和相位信号和通过玻璃基底测得的系统频率响应。可以看出,激发功率越高,振幅相位逐渐增大,随着频率的增大振幅和相位信号逐渐减小,但相位信号达到最低点会开始增大。在进一步进行拟合处理之前,需要将实验测量信号除以相应的系统响应,以消除系统响应对测量结果的影响,即振幅数据相除,相位数据相减。

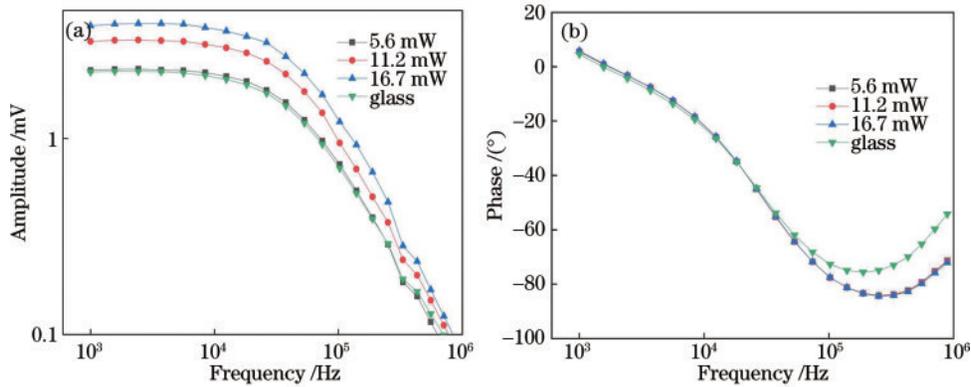


图 7 不同功率时样品的 PCR 信号。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 7 PCR signal of samples at different powers. (a) Amplitude; (b) phase

为了研究 PbS-CQD 薄膜的激子复合特性和陷阱特性,根据理论模型对实验结果进行了多参数拟合处理。图 8 给出了不同激发光功率时的 PCR 归一化振幅和相位信号及多参数拟合结果,其中图 8(b)中的插图为局部放大结果。可以看出,理论和实验结果基本一致。图 8(a)中实验和拟合结果存在偏差,原因有实验噪声和系统频率响应测量误差两个方面,后者可能与光电探测器对不同波长光信号的响应不同有关^[26],需要后续进行深入研究。图 8(b)低频相位出现较大偏差主要是系统响应去除不完全所致,这与探测器对不同波长信号的响应不同有关。表 1 所示为 3 组不同功率的激发光多参数的拟合结果,包括有效寿命、退俘获寿命、载流子寿命。由表 1 可知,拟合的陷阱俘获寿命随激光功率的增大而逐渐减小,从 5.6 mW 时的

342 ns 减小至 16.7 mW 时的 312 ns,而激子有效寿命和陷阱退俘获率不随激光功率变化而变化。减小的陷阱俘获寿命表明载流子被陷阱俘获的概率增大,这可能与高激光功率激发时载流子浓度增大有关。本实验测得的激子有效寿命与其他文献报道的量子点的有效寿命基本一致^[27]。

为了分析样品光载流子辐射特性的均匀性,进一步采用该实验装置测量了不同位置的 PCR 振幅和相位并分析其变化情况。实验中,激光器的调制频率设置为 200 kHz,该频率点具有较大的相位信号且振幅信号仍然较大,具有较大的信噪比。位置扫描通过移动样品所在的三维位移台实现,移动步长设置为 50 μm,扫描区域为 0.25 cm×0.25 cm,结果如图 9 所示。可以看出,振幅成像图中不同位置振幅在 2.320~

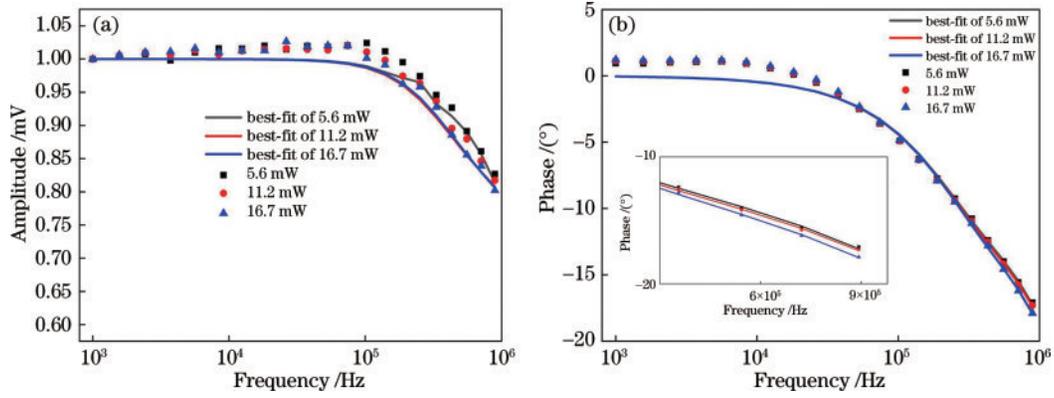


图 8 实验测量 PCR 信号及最佳拟合结果。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 8 Measured PCR signals and best-fit results. (a) Amplitude; (b) phase

表 1 最佳拟合参数

Table 1 Best-fitted parameter

Power /mW	$\tau_{\text{eff}} / \text{ns}$	τ_i / ns	$R_T / (10^6 \text{ s}^{-1})$
5.6	48.7 ± 0.018	342 ± 0.125	4.60 ± 0.039
11.2	48.7 ± 0.129	336 ± 0.586	4.84 ± 0.021
16.7	50.2 ± 0.003	312 ± 0.043	4.67 ± 0.009

4.060 mV 之间变化, 相位成像图中不同位置相位在 $5.225^\circ \sim 6.355^\circ$ 范围内变化, 振幅和相位随位置变化较大。造成振幅信号不均匀可能是因为制备的薄膜不同位置的厚度不同, 厚度越大, 探测区域内的量子点数量越多, PCR 振幅越大。根据图 8(b) 的分析结果, 图 9(b) 中的相位不均匀的情况可能与表面配体钝化质量不均匀导致量子点的表面陷阱特性不同有关。

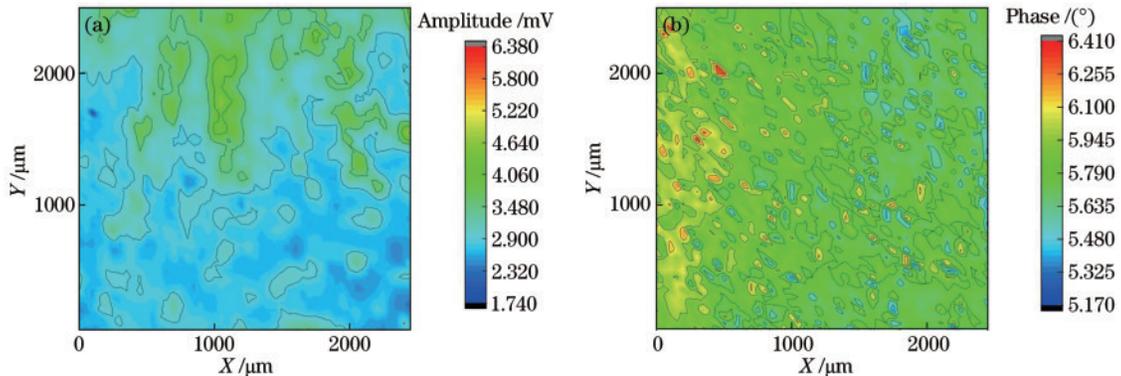


图 9 PCR 信号随位置的变化情况。(a) 振幅; (b) 相位

Fig. 9 Dependences of PCR signal on position. (a) Amplitude; (b) phase

5 结 论

提出了一种不考虑量子点间净载流子传输的载流子输运速率模型, 并通过 PCR 频率扫描实验和多参数拟合得到最佳激子的有效寿命、陷阱俘获寿命和陷阱退俘获率等参数, 实验结果证实了提出的理论模型的有效性, 可以用于量子点薄膜载流子输运特性的快速测量与表征。同时对样品光载流子辐射特性的空间分布进行了分析并讨论了其产生原因。

参 考 文 献

[1] 陈雯柏, 马航, 叶继兴, 等. 量子点发光二极管的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 110003.
Chen W B, Ma H, Ye J X, et al. Research progress on quantum dot light emitting diodes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 110003.

[2] 杨丹, 王登魁, 方铨, 等. PbSe 量子点表面修饰工程与应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1500004.
Yang D, Wang D K, Fang X, et al. Research progress in surface modification engineering and application of PbSe quantum dots[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1500004.

[3] Kramer I J, Sargent E H. Colloidal quantum dot photovoltaics: a path forward[J]. ACS Nano, 2011, 5(11): 8506-8514.

[4] Ning Z J, Gong X W, Comin R, et al. Quantum-dot-in-perovskite solids[J]. Nature, 2015, 523(7560): 324-328.

[5] Sargent E H. Infrared quantum dots[J]. Advanced Materials, 2005, 17(5): 515-522.

[6] Tang J, Sargent E H. Infrared colloidal quantum dots for photovoltaics: fundamentals and recent progress[J]. Advanced Materials, 2011, 23(1): 12-29.

[7] 孙立奇, 王登魁, 房丹, 等. CdSe 量子点修饰 ZnO 微米

- 线快速响应的紫外光电探测器[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1303001.
- Sun L Q, Wang D K, Fang D, et al. Quantum dots modified ZnO based fast-speed response ultraviolet photodetector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1303001.
- [8] 肖姗, 许秀来. 基于半导体量子点的片上手性纳米光子器件[J]. 光学学报, 2022, 42(3): 0327009.
- Xiao S, Xu X L. On-chip chiral nanophotonic devices based on semiconductor quantum dots[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(3): 0327009.
- [9] Pattantyus-Abraham A G, Kramer I J, Barkhouse A R, et al. Depleted-heterojunction colloidal quantum dot solar cells[J]. ACS Nano, 2010, 4(6): 3374-3380.
- [10] Bozyigit D, Lin W M M, Yazdani N, et al. A quantitative model for charge carrier transport, trapping and recombination in nanocrystal-based solar cells[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6180.
- [11] Istrate E, Hoogland S, Sukhovatkin V, et al. Carrier relaxation dynamics in lead sulfide colloidal quantum dots [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2008, 112(10): 2757-2760.
- [12] Mandelis A, Batista J, Shaughnessy D. Infrared photocarrier radiometry of semiconductors: Physical principles, quantitative depth profilometry, and scanning imaging of deep subsurface electronic defects[J]. Physical Review B, 2003, 67(20): 205208.
- [13] Xia J, Mandelis A. Direct-search deep level photothermal spectroscopy: an enhanced reliability method for overlapped semiconductor defect state characterization[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(26): 262112.
- [14] Nordal P E, Kanstad S O. New developments in photothermal radiometry[J]. Infrared Physics, 1985, 25(1/2): 295-304.
- [15] Batista J, Mandelis A, Shaughnessy D, et al. Deep subsurface electronic defect image contrast and resolution amplification in Si wafers using infrared photocarrier radiometry[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(10): 1713-1715.
- [16] Fonoberov V A, Alim K A, Balandin A A, et al. Photoluminescence investigation of the carrier recombination processes in ZnO quantum dots and nanocrystals[J]. Physical Review B, 2006, 73(16): 165317.
- [17] Tongay S, Suh J, Ataca C, et al. Defects activated photoluminescence in two-dimensional semiconductors: interplay between bound, charged and free excitons[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2657.
- [18] Saxena A, Yang S X, Philipose U, et al. Excitonic and pair-related photoluminescence in ZnSe nanowires[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(5): 053109.
- [19] Wang H N, Ji Z W, Xiao H D, et al. Influence of injection current and temperature on electroluminescence in InGaN/GaN multiple quantum wells[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2014, 59: 56-59.
- [20] Kim Y, Ban K Y, Kuciauskas D, et al. Impact of delta-doping position on photoluminescence in type-II InAs/GaAsSb quantum dots[J]. Semiconductor Science and Technology, 2015, 30(3): 035006.
- [21] Chuang C H M, Maurano A, Brandt R E, et al. Open-circuit voltage deficit, radiative sub-bandgap states, and prospects in quantum dot solar cells[J]. Nano Letters, 2015, 15(5): 3286-3294.
- [22] Kang M S, Sahu A, Norris D J, et al. Size- and temperature-dependent charge transport in PbSe nanocrystal thin films[J]. Nano Letters, 2011, 11(9): 3887-3892.
- [23] Hu L L. Quantitative carrier transport in quantum dot photovoltaic solar cells from novel photocarrier radiometry and lock-in carrierography[D]. Toronto: University of Toronto, 2017.
- [24] Ning Z J, Voznyy O, Pan J, et al. Air-stable n-type colloidal quantum dot solids[J]. Nature Materials, 2014, 13(8): 822-828.
- [25] Hu L L, Mandelis A, Melnikov A, et al. Study of exciton hopping transport in PbS colloidal quantum dot thin films using frequency- and temperature-scanned photocarrier radiometry[J]. International Journal of Thermophysics, 2017, 38(1): 7.
- [26] Huang Q P, Li B C. Self-eliminating instrumental frequency response from free carrier absorption signals for silicon wafer characterization[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(4): 043104.
- [27] Wang J, Mandelis A, Sun Q M, et al. Temperature- and size-dependent exciton dynamics in PbS colloidal quantum dot thin films using combined photoluminescence spectroscopy and photocarrier radiometry[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(10): 5759-5766.