

文章编号: 1006-4710(2011)02-0151-05

GaAs 光电导开关激子效应的光电导特性

马湘蓉, 施卫

(西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 从 GaAs 光电导开关的激子效应和光激发电荷畴理论基础出发, 研究了强电场触发下 GaAs 光电导开关激子效应的光电导特性; 光激发电荷畴与激子效应的相互作用以及激子的形成、传输及离解过程形成自由电子和空穴, 为激子激发电光导提供了必要的条件。影响激子效应的光电导特性的主要因素有: 激子能级的吸收, 束缚激子及光激发电荷畴引起的能带重整化效应, 多声子跃迁, 束缚激子沿位错线发生分裂和漂移。在上述因素的相互耦合作用下, 使得 GaAs 光电导开关激子效应的光电导呈现出一定的振荡特性。

关键词: GaAs 光电导开关; 光激发电荷畴; 激子效应; 光电导特性

中图分类号: 7220H

文献标志码: A

Photoconductive Characteristics of Exciton Effect upon GaAs Photoconductive Switch

MA Xiangrong, SHI Wei

(Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Starting from the effect of GaAs Photoconductive Semiconductor Switch (PCSS) exciton and Photo-Activated Charge Domain (PACD) theory, this paper studies photoconductive behaviors of GaAs photoconductive switch exciton effect in the case of strong electric field excitation. The interaction of PACD and exciton effect and exciton formation, transmission and free electrons and holes formed in the process of dissociation can provide the necessary conditions for exciton activated photoconduction. The major factors affecting exciton effect photoconductive behaviors are: exciton energy absorption, bound exciton and PACD induced band gap renormalization, multi-phonon transition, bound exciton split and drift along dislocation stress. In the case of coupling actions by the above factors, the photoconduction of GaAs photoconductive switch exciton effect appears to have a certain oscillation behaviors.

Key words: GaAs Photoconductive Semiconductor Switch (PCSS); Photo-Activated Charge Domain (PACD); exciton effect; photoconductive behaviors

GaAs 光电导开关 (GaAs Photoconductive Semiconductor Switch, GaAs PCSS) 是利用半导体 (如 GaAs, SiC, InP, 金刚石等) 与高速脉冲激光器相结合组成的一类新型功率器件。GaAs 光电导开关在光电子学领域、超快电子学领域、高功率超宽带产生领域、微波通信领域以及军事科技方面具有非常广泛的应用^[1-5]。

根据量子学原理从半导体结构的微观状态出

发, 利用光激发电荷畴^[6-10]和激子效应理论, 对 GaAs 光电导开关激子效应的光电导特性进行分析。认为激子效应与光激发电荷畴的相互作用以及激子的形成、传输及离解过程形成自由电子和空穴, 为激子激发电光导提供了必要的条件。GaAs 光电导开关内存在诸多影响激子效应光电导的因素, 在这些因素的相互耦合作用下, 激子效应的光电导呈现出一定的振荡特性。

收稿日期: 2011-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目 (2007CB310406); 国家自然科学基金资助项目 (50837005, 10876026)。

作者简介: 马湘蓉 (1972-), 女, 湖南长沙人, 博士生, 研究方向为超快光电子器件。E-mail: mxr310@163.com。

施卫 (1957-), 男, 浙江金华人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为超快功率半导体器件及太赫兹技术。

E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn。

1 理论分析

1.1 激子效应

当激光触发 GaAs 光电导开关芯片时,瞬间产生的载流子密度可达 10^{20} cm^{-3} 。芯片体内存在杂质—激子、电子—激子、激子—激子散射以及声子协助的辐射复合。光激发会导致激子的形成和辐射复合发光^[11],激子呈电中性,因而不形成电流,但却可以通过迁移过程间接地传递能量,这些能量在激子复合时释放出来^[12-14]。形成激子所需的光能为:

$$h\nu = E_g - E_n + \frac{hK^2}{4\pi(m_e^* + m_p^*)} \quad (1)$$

式中, E_g 为 GaAs 禁带宽度, E_n 为激子能级, m_e^* 为电子质量, m_p^* 为空穴质量, h 为普朗克常数, K 为激子波矢。

激子的能级定义为^[15]:

$$E_n = -\frac{\mu q^4}{8\varepsilon^2 h^2 n^2} \quad (2)$$

式中, ε 为介电常数, q 为电子电量, n 为能级数, μ 为电子和空穴的折合质量: $\mu = m_p^* m_e^* / (m_p^* + m_e^*)$, m_e^* , m_p^* 分别为电子、空穴的有效质量。

从(2)式可见,激子有无穷多个能级。当 $n = 1$ 时, $E_1 = 0.00456 \text{ eV}$ 是激子的基态能级; $n > 2$ 时,这些能级几乎是连续的; n 为无穷时, $E_\infty = 0$, 相当于导带底能级,表示电子和空穴完全脱离相互束缚,电子进入导带,而空穴仍留在价带。因此激子效应可以对光电导产生贡献,激子离解为自由电子和空穴需要吸收的最低单光子能量为 1.4254 eV , 即吸收长波限为 869.8 nm 。

当激子的密度达到约 10^{12} cm^{-3} 量级时,激子间的平均间距只有约 $100 \text{ \AA}$, 与激子的直径接近,束缚能逐渐减少,自由激子越来越多。自由激子在运动过程中,将能量从晶体的一处输运到另一处,然后通过电子空穴复合发光。束缚激子在激发(形成)和复合(消亡)过程中常有声子参与并且通过发射声子而损失能量。因为激子所在范围常常包括几个晶格,所以对于束缚激子可以写出复合时辐射能量的关系为:

$$h\nu = E_g - E_n - E_b \pm mE_a \quad (3)$$

式中, E_a 是声子的能量, m 表示参与跃迁的声子数,复合时放出声子取‘+’号,形成时吸收声子则取‘-’号, E_b 表示杂质对激子的束缚能。设杂质的离化能为 E_i , 根据经验公式,杂质对激子的束缚能和杂质的离化能之间的关系可以表示为 $E_b = 0.1E_i$ 。在 GaAs 半导体中可观察到束缚激子发光,束缚在杂

质缺陷上的束缚激子的复合发光是最强的,是非本征辐射复合过程,即使当杂质含量很低($< 10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) 时它们对半导体辐射复合光谱的影响仍十分显著。束缚激子辐射复合过程常伴随有声子参与,通常束缚激子比自由激子和通过杂质的跃迁有更强的光发射。

在半导体中依靠库仑相互作用而联系在一起的激子其相互作用是比较微弱的,所以激子能级距离导带底很近。表明当光波长与 GaAs 本征吸收限波长相差不大时,最有可能形成激子吸收。

当自由载流子增加到一定浓度时,电子和空穴之间的库仑作用将受到屏蔽,从而降低了激子的离化能,使激子容易离解,激子效应就将消失。因此,激子效应仅发生在畴体外的临近区域,畴体内激子效应就被抑制了。激子激发和电荷转移激子的形成、传输及离解在 GaAs 光电导开关激子效应的光电导过程中起着重要的作用。

1.2 光激发电荷畴与激子效应相互作用

光激发电荷畴与激子效应相互作用如图1所示。由于 GaAs 直接带隙复合产生的光子波长是 $(875 \pm 10) \text{ nm}$, 电子空穴复合的几率很大,复合将向四周发射光子。

当达到雪崩倍增强度时,一个入射光子可激发多倍电子—空穴对参与导电过程。激子吸收了光激发电荷畴体内经电子空穴复合发射的光子后很容易发生离解。

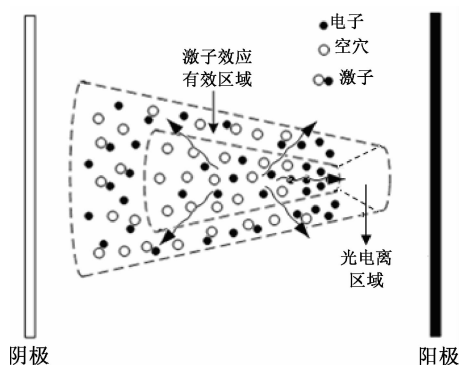


图1 光激发电荷畴与激子效应相互作用示意图

Fig. 1 The schematic diagram of PACD-Exciton effect interactions

GaAs 光电导开关中也存在有电子—空穴直接辐射复合发光、自由激子复合发光、激子—激子碰撞发光和声子参与的激子发光等引起发光的过程。因此,激子在吸收了这些过程释放的能量后,克服电子—空穴对的库仑束缚力,完成电子向导带的跃迁。当畴头部高浓度高能量电子以 $5 \times 10^8 \text{ cm/s}$ 速度^[16]

向阳极漂移时,距阳极越近则畴前电场越强,畴头部电子密度越高,电子碰撞电离越激烈,辐射复合发生的光子数也不断增多,则激子效应在畴头部外区域作用也就越强烈。又由于激子也可吸收畴在漂移过程中散失的热量,发生热离解。激子离解后产生的大量电子从畴四周不同的方位同时向畴体内注入,增强了畴内的载流子浓度,最终对光电导产生贡献。激子效应的光电导在一定条件下由半导体材料性质决定,其扩散长度只与它的浓度梯度有关,而与偏置电压的高低无关。

光激发电荷畴与光生空穴之间产生了一个与外加电场反方向的电场,具有电场屏蔽效应,因此使畴前电场增强。GaAs 是直接带隙半导体,其能级间复合的特性如图 2 所示。

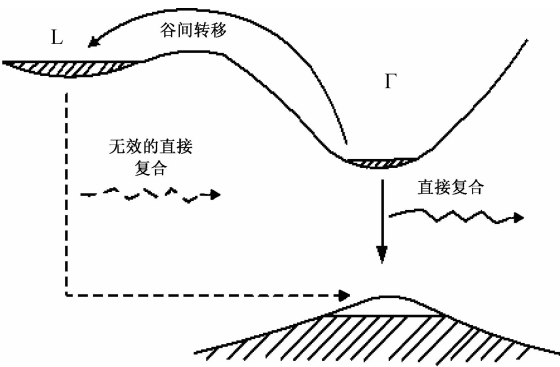


图 2 GaAs 半导体的能级间复合特性

Fig. 2 Band-band recombination characteristic in GaAs

GaAs 半导体具有多能谷结构,L 能谷和 Γ 能谷间传导的电子与局部电场近似成正比关系。在高场影响下 GaAs 也可表现出一定的间接带隙的特征,结果是在强偏置电压条件下,有大量的电子从 Γ 能谷向 L 能谷迁移, Γ 能谷中的电子数目急剧减少,从而抑制了导带和价带之间电子—空穴复合的作用,并减少了辐射发射光子的作用,畴头部高浓度电子发生辐射复合的几率降低。当畴头部电场达到一定程度时,辐射复合达到了最佳效率(即饱和)。在电场达到 $10^4 \sim 10^5$ V/cm 时,激子势能变化达到 10 meV,大于激子基态的能量,因此激子容易发生离解。

由于当温度发生变化时,载流子的复合系数将随之改变,温度越高复合系数越小。激子稳定性取决于温度、电场、载流子浓度等因素,在一定温度时激子效应会发生猝灭;在高电场作用和高载流子浓度这两种情况下,将会导致激子的饱和吸收效应。

因此,当光激发电荷畴向阳极漂移到一定程度时,激子的辐射复合、载流子数目以及寿命都趋于饱

和。此时对应于激子效应的光电导进入了稳态。

2 激子效应的光电导特性

2.1 特性分析

引起光电导现象的原因主要是载流子数目变化引起的光电导和因载流子迁移率变化而发生的光电导。半导体的光学性质将依赖于由光激发产生的数量很多的电子—空穴对、激子以及它们之间的相互作用。

激子是相互束缚的电子—空穴对,它们可以在体内运动,对电导率没有贡献,因而一般不引起光电导效应。但可以通过热激发、激子—激子非弹性碰撞、电场电离等方法离解激子,以形成自由电子和空穴,为激子激发电光导提供了必要的条件。

GaAs 导带的某些能量极大值位于绝对最小值斜上方,且电子位于前者时的有效质量显著大于它位于后者时的。电子通过与声子相互作用可跃迁到上能谷中。电子位于上能谷状态时是不稳定的,它们通过与声子的相互作用可转移到下能谷中并使电流增大。

一般说来,电子与光学声子的互作用对应的弛豫时间约为 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ s,与声学声子的互作用时间要长一些,主要发生在热载流子已经弛豫到最低带边缘附近能量小于 $\hbar\omega_0/2\pi$ (ω_0 为光学声子频率)的情况。这时它已不再能与光学声子交换能量。

在一定情况下,热平衡能级与热激发能级上的载流子数之比等于复合时间与弛豫时间之比:

$$\frac{n_c}{n_i} = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (4)$$

式中, n_c 为热平衡能级上的载流子数, n_i 为热激发能级上的载流子数, τ 为复合时间, τ_r 为弛豫时间,且

$$n_c = G_0 \frac{\tau^2}{(\tau + \tau_r)}, G_0 \text{ 为光学产生率。}$$

当复合时间大于弛豫时间,即 $\tau > \tau_r$,热电子效应可忽略,可以认为所有过剩载流子都处于能带边附近的冷激发态中,过剩载流子浓度 Δn 与 n_c 相等,即 $\Delta n = n_c = G_0 \tau$,这种情况下,会发生很强的激子辐射复合过程,为激子引发电光导提供了一定的条件。在光电导开关 GaAs 芯片体内存在杂质—激子、电子—激子、激子—激子散射以及声子的相互作用,畴外激子的复合几率明显大于畴外自由载流子的复合几率。又由于在开关体内也会发生激子—激子、激子—电子和激子—杂质的碰撞电离,其作用也在相应程度上加速了激子的离解,对激子效应的光电导产生了一定贡献。

2.2 影响因素

GaAs 光电导开关芯片晶体处于室温时,当激子受到外界施加的强偏置电场作用后很容易由于热激发而成为自由电子,而 GaAs 晶体的电导和晶体内的自由电子成正比。在弱光激发下,GaAs 芯片的电导与外界施加的偏置电压成正比。当偏置电场较强时形成的激子较多,自由电子在外电场作用下做定向运动时,则有明显的电子—激子散射效应。因此,可通过激子态激发之后离解成电荷转移激子,电荷转移激子沿晶格逐级跳跃,直至最后离解生成自由载流子来实现光电导。

开关芯片体内束缚激子离解后产生电子和空穴并释放光子和声子,光子向各方向发射。由于空间电荷畸变了原来的电场,新形成的光电子不一定在原来的畴路径上。激子离解后产生的电子,可能受到畴中部空穴的吸引,而从畴的中部等位置注入进去。还有一部分向阳极漂移,受畴头部高场作用而汇集入畴头部加强了畴头部的载流子浓度。电子在注入畴的过程中,畴内电荷密度不断变化,引起电流变化,使得激子效应的光电导表现出了振荡的特性。激子辐射复合也存在弛豫,弛豫与复合是相互竞争的过程,振荡的周期与激子的复合时间和弛豫时间有关。由于激子—声子耦合的变强以及激子—激子散射的增强,弛豫时间将进一步缩短。

激子能级吸收也会造成 GaAs 光电导开关的光电导振荡现象。激子与光子和声子耦合前后的能带变化如图 3 所示,光子和声子对激子能谱有影响,声子的作用使激子能带变窄,光子的影响使能带分裂成两支,光子和激子复合成一种准粒子。



图3 激子与光子和声子耦合前后的能带变化示意图

Fig. 3 Band changes of exciton and optical phonon coupling pre-and post

因此,在这种能带变化的波动下,影响了激子激发的光电导特性。由于电子浓度的增多,自由电子有效地屏蔽了激子,主要是发生能带重整化。

束缚激子及光激发电荷畴,也会引起能带重整化效应。能带重整化效应对半导体禁带宽度 E_g 及光吸收边的影响很显著,使得半导体禁带宽度趋于收缩,表现出激子效应引发的光电导具有了振荡的特性。

GaAs 芯片内束缚激子离解时可以放出光子和

声子,电子和空穴复合时,可以以激发多个声子的形式放出多余的能量。GaAs 的禁带宽度为 1.425 eV,而一个声子的能量约为 0.06 eV 左右。由于实际芯片材料中存在着许多杂质和缺陷,因而在禁带中也就自然存在着许多分立的能级。当电子依次落入在这些能级时,将会发生多声子跃迁。因此,在多声子跃迁的协助下,激子效应诱发的光电导呈现出了较强的振荡特性。在不同偏振情况下 GaAs 中束缚激子发光谱线随 $\langle 100 \rangle$ 方向应力增加而分裂和漂移的情况^[11],主要是由于导带电子和价带空穴随应力作用发生了分裂和漂移,影响了激子效应的光电导特性,使其呈现出了振荡的现象。

运动着的激子通过电子和空穴的复合,辐射出光子和声子,并保持动量和能量守恒。通过声子散射、碰撞离化、缺陷散射和场离化等途径,激子离解成自由电子和空穴。

在光激发电荷畴开始成核以及随后生长的阶段,光激发电荷畴与激子效应的相互作用,以及激子激发和电荷转移激子的形成、传输及离解都在 GaAs 开关激子效应的光电导过程中起着重要的作用。

光激发电荷畴内辐射复合、激子效应以及外电路也在不断消耗和散失能量,这样畴的生存条件就遭到了破坏。又由于光生载流子是有一定寿命的,开关经长时间的锁定后,载流子浓度不断减少直至逐渐消散,最终导致激子效应的光电导消失。

3 结 论

1) 光激发电荷畴与激子效应的相互作用以及激子的形成、传输及离解过程形成自由电子和空穴,为激子激发电光导提供了必要的条件。

2) 当光激发电荷畴的生存条件遭到破坏以及开关内能量的消耗殆尽,最终导致激子效应的光电导消失。

3) 影响激子效应的光电导特性的主要因素有:激子能级的吸收,束缚激子及光激发电荷畴引起的能带重整化效应,多声子跃迁,导带电子和价带空穴随位错应力作用发生分裂和漂移。在上述因素的相互耦合作用下,激子效应的光电导呈现出一定的振荡特性。

参考文献:

[1] 袁建强,谢卫平,周良骥,等. 光导开关研究进展及其在脉冲功率技术中的应用[J]. 强激光与粒子束,2008,20(1):171-176.

Yuan Jianqiang, Xie Weiping, Zhou Liangji, et al. Developments and applications of photoconductive semiconductor

- switches in pulsed power technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 171-176.
- [2] 施卫, 田立强. 半绝缘 GaAs 光电导开关的击穿特性[J]. 半导体学报, 2004, 25(6): 691-696.
Shi Wei, Tian Liqiang. Breakdown characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive switch[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(6): 691-696.
- [3] Siegel W, Schulte S, Kretzer U, et al. Parameters of microscopic non-uniformities and their influence on the hall mobility in undoped high-resistivity LEC GaAs[J]. Semiconductor Science and Technology, 1999, 14(10): 905-908.
- [4] 王馨梅, 施卫. 影响光电导开关关断特性的主次因素[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(4): 407-410.
Wang Xinmei, Shi Wei. Primary and secondary influencing factors of turn-off characteristics on ultra-fast photoconductive semiconductor switches[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(4): 407-410.
- [5] Mogilestue C. Monte Carlo particle modeling of small semiconductor devices[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 30(2): 173-208.
- [6] 施卫, 梁振宪. 高倍增高压超快 GaAs 光电导开关中的光激发畴现象[J]. 半导体学报, 1999, 20(1): 53-57.
Shi Wei, Liang Zhenxian. Optically activated charge domain phenomena in high gain ultra fast high voltage GaAs photoconductive switches[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(1): 53-57.
- [7] Shi Wei, Dai Huiying, Sun Xiaowei. Photon-activated charge domain in high-gain photoconductive switches[J]. Chinese Optical Letter, 2003, 1(9): 553-555.
- [8] Shi Wei. Optically activated charge domain model for high-gain GaAs photoconductive switches[J]. Chinese Journal of semiconductors, 2001, 22(12): 1481-1485.
- [9] Shi Wei, Tian Liqiang. Mechanism analysis of periodicity and weakening surge of GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(20): (103-1)-(103-3).
- [10] Shi Wei, Qu Guanghui, Xu Ming, et al. Current limiting effects of photoactivated charge domain in semi-insulating GaAs photoconductive switch[J]. Applied Physics Letter, 2009, 94: 072110.
- [11] 沈学础. 半导体光谱和光学性质[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [12] Thomas D G., Hopfield J J. Excitation and absorption edge of ZnO[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(10): 2282-2286.
- [13] Msalle M E, Wolfe J P. Phonon production in weakly photoexcited semiconductors: quasidiffusion in Ge, GaAs and Si[J]. Physical Review B, 1997, 56(15): 9557-9564.
- [14] Sermage B, Voos M. Reabsorption of excitonic luminescence in direct band-gap semiconductors [J]. Physical Review B, 1977, 15(8): 3935-3946.
- [15] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理学(第7版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [16] Loubriel G M, Zutavern F J, O'Malley M W, et al. High gain GaAs switches for impulse sources measurement of the speed of current filament[C]//Power Modulator Symposium, IEEE Conference Record of the 1994 Twenty-First International, Costa Mesa, 1994, 120-123.

(责任编辑 杨小丽)

简 讯

西安理工大学隆重举行土木建筑工程学院成立大会

西安理工大学土木建筑工程学院成立大会于2011年5月21日上午在金花校区图书馆报告厅隆重举行。校党委副书记傅有明在会上宣读了关于学校成立土木建筑工程学院的决定, 陕西省教育厅副厅长郭立宏与校党委书记周孝德共同为土木建筑工程学院揭牌。

刘丁校长分析了当前土木建筑工程领域发展的大环境, 简要回顾了土木建筑工程学院成立的历程, 指出成立土木建筑工程学院是我校进一步优化学科专业布局, 实现建设高水平教学研究型大学的一项重要举措。对土木建筑工程学院今后的发展, 提出了三点期望: 一要发挥优势, 突出特色, 要认真研究国家社会发展对人才的需求, 结合学院实际, 加强学科交叉与融合, 以人才培养为核心, 努力形成学科建设、科学研究鲜明的办学特色; 二要加强交流, 提高水平, 要抢抓机遇, 广泛建立合作和联系, 注重实践, 增强服务国家和经济建设的能力与水平; 三要开拓创新, 科学发展, 力争发展成为国内知名的土木建筑学科和专业, 努力为国家 and 地方经济建设、社会发展做出更大的贡献。

(摘自西安理工大学新闻网 2011-05-23)