

光抽运太赫兹探测技术研究 ZnSe 的光致载流子动力学特性

李高芳 马国宏 马红 初凤红 崔昊杨 刘伟景 宋小军 江友华 黄志明 褚君浩

Photocarrier dynamics in zinc selenide studied with optical-pump terahertz-probe spectroscopy

Li Gao-Fang Ma Guo-Hong Ma Hong Chu Feng-Hong Cui Hao-Yang Liu Wei-Jing Song Xiao-Jun Jiang You-Hua Huang Zhi-Ming Chu Jun-Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 247201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.247201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.247201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺铁铌酸锂晶体的光电导衰减特性研究

Photo-conductivity decay properties of Fe-doped congruent lithium niobate crystals

物理学报.2013, 62(3): 037201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037201>

VO₂ 薄膜 Vis-NIR 及 NIR-MIR 椭圆偏振光谱分析

Spectroscopic ellipsometry analysis of vanadium oxide film in Vis-NIR and NIR-MIR

物理学报.2016, 65(12): 127201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.127201>

续流二极管续流瞬态反向恢复电压尖峰机理研究

Investigation into the reverse recovery voltage peak mechanism of freewheeling diode at a switching transition

物理学报.2014, 63(21): 217201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.217201>

基于电压变化率的 IGBT 结温预测模型研究

Investigation of the prediction model of IGBT junction temperature based on the rate of voltage change

物理学报.2014, 63(17): 177201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.177201>

沟槽形状对硅基沟槽式肖特基二极管电学特性的影响

Effect of the trench shape on the electrical properties of silicon based trench barrier schottky diode

物理学报.2014, 63(12): 127201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.127201>

光抽运太赫兹探测技术研究 ZnSe 的光致载流子动力学特性*

李高芳^{1)2)†} 马国宏³⁾ 马红⁴⁾ 初凤红¹⁾ 崔昊杨¹⁾ 刘伟景¹⁾
宋小军¹⁾ 江友华¹⁾ 黄志明²⁾ 褚君浩²⁾

1)(上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090)

2)(中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

3)(上海大学物理系, 上海 200444)

4)(山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

(2016年10月13日收到; 2016年11月8日收到修改稿)

利用光抽运-太赫兹探测技术, 研究了 ZnSe 的载流子弛豫过程和太赫兹波段电导率的时间演化过程. 在中心波长为 400 nm 的抽运光作用下, ZnSe 的载流子弛豫过程用双指数函数进行了很好的拟合, 其快的载流子弛豫时间和慢的载流子弛豫时间均随抽运光密度的增加而增大. 快的载流子弛豫时间随抽运光密度的增加而增大与样品中的缺陷有关, 随着激发光密度的增加, 激发的光生载流子浓度增大, 缺陷逐渐被光生载流子填满, 致使快的载流子弛豫时间增大; 慢的载流子弛豫时间随着抽运光密度增加而增大主要和带填充有关. 不同抽运光延迟时间下 ZnSe 在太赫兹波段的瞬态电导率用 Drude-Smith 模型进行了很好的拟合. 对 ZnSe 光致载流子动力学特性的研究为高速光电器件的设计和制造提供了重要的实验依据.

关键词: 光抽运-太赫兹探测, 光密度, 光生载流子, 瞬态电导率

PACS: 72.20.Jv, 72.20.-i, 42.65.Re, 72.80.Ey

DOI: 10.7498/aps.65.247201

1 引言

半导体材料的载流子特性是开发各种重要器件的基础. 通过对半导体中光生载流子超快动力学的研究, 可以获得其载流子产生和复合的信息, 并进一步认识其微观动力学机理, 为改善半导体材料和器件提供新的数据, 为高速光电器件的设计和制作^[1,2]提供重要的实验依据.

光抽运-太赫兹探测技术是一种新兴的应用前景良好的超快载流子动力学研究技术. 该技术是利

用同步产生的红外抽运脉冲和太赫兹探测脉冲来实现测量的. 通过该技术既可以直接地观测到样品信号的光致变化所反映出来的信息, 又能提供一个亚皮秒量级(最高可达 200 fs)时间分辨率的载流子动力学过程, 还能够将自由载流子、局域化载流子、激子和表面等离子体共振区分开来^[3]. 太赫兹辐射对半导体表面的载流子分布和变化十分敏感, 很适合被用作探测波来反映载流子的运动状况. 相对于太赫兹时域光谱技术, 光抽运-太赫兹探测光谱技术更加复杂, 前者所测得的信息为样品的静态特

* 国家自然科学基金(批准号: 11404207, 11674213)、上海市自然科学基金(批准号: 14ZR1417500)、上海市科委地方院校能力建设项目(批准号: 15110500900, 14110500900)、上海市教委科研创新项目(批准号: 15ZZ086)、上海市教委高校青年教师培养资助项目(批准号: ZZsdl15106)和上海电力学院人才引进基金(批准号: K2014-028)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: li_gaofang@163.com

性, 而后者所测得的是物质的动态变化信息. 在过去几年里, 利用光抽运-太赫兹探测技术通过光激发样品的研究方法研究半导体材料非平衡载流子动力学过程已经取得了不少成果^[4-13].

近年来, 宽禁带半导体材料在光信息处理、光储存、集成光学、短波长激光二极管的开发及相关的研究等领域的应用而倍受人们的关注. ZnSe 晶体是典型的宽禁带 II-VI 族直接带隙半导体, 室温下的禁带宽度为 2.7 eV, 透光范围在 0.5—15 μm , 具有优异的理化性质, 可用于红外透镜、激光窗口、集成光学器件、制造蓝光半导体激光器件、光探测器件、非线性光学器件和波导调制器件等^[14-17]. 关于 ZnSe 能够产生和探测太赫兹波已经有很多相关报道^[18-20]. 在过去几年里, ZnSe 在太赫兹波段的折射率、介电常数和吸收系数等特性引起了人们的关注^[21,22], 但研究者对于 ZnSe 块体材料在太赫兹波段的载流子动力学特性仍然了解很少. 本文利用光抽运-太赫兹探测技术研究 ZnSe 的载流子弛豫过程和太赫兹波段电导率的时间演化过程. 在中心波长为 400 nm 的抽运光作用下, ZnSe 的载流子弛豫过程随着抽运光密度的增加, 其快的载流子弛豫时间和慢的载流子弛豫时间均增大; 在中心波长为 400 nm, 抽运光密度为 240 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 作用下 ZnSe 的瞬态电导率随着抽运光延迟时间的增加逐渐减小, 并用 Drude-Smith 模型进行了很好的拟合. 利用光抽运-太赫兹探测技术对 ZnSe 光致载流子动力学特性的研究为高速光电器件的设计和制作提供重要的实验依据.

2 实验

实验中所用的实验光路系统是光抽运-太赫兹探测实验系统, 其光路如图 1 所示. 实验中所用的激光光源是 Spectra Physics 公司生产的再生放大器 (Spitfire Pro), 它以振荡器 (Mai Tai HP) 的飞秒脉冲作为种子光. 此放大器的中心波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 120 fs. 从激光器发出的光被分束片分为三部分, 一部分用于产生太赫兹波, 称为产生光, 一部分用于探测太赫兹波, 称为探测光, 另外一部分较强的光用于激发样品, 称为抽运光. 太赫兹波是由光强约为 100 mW、中心波长为 800 nm 的光聚焦于厚 1 mm, (110) 取向的 ZnTe 晶体上产生的^[23]. 太赫兹波是通过自由电光取样^[24]方法探测的. 弱的探测光透过厚 1 mm, (110) 取向的另外一块 ZnTe 晶体后进入平衡探测器, 接入锁相放大器, 通过电脑采集到太赫兹波信号. 抽运光是通过将放大器出来的另外一部分比较强的中心波长为 800 nm 的光经 BBO 晶体倍频产生, 中心波长为 400 nm (3.1 eV). 通过连续可调衰减片的调节, 抽运光密度变化范围为 40—240 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. 实验中, 太赫兹波光斑直径约为 1.5 mm, 激发样品的抽运光光斑直径约为 6 mm. 抽运光光斑直径大于探测光光斑直径的两倍, 这能够充分保证探测光探测到被光均匀激发样品的部分. 实验中所用的块体 ZnSe 样品是从合肥科晶材料技术有限公司购进的, 厚 0.5 mm, (0001) 取向. 所有实验均在室温下进行.

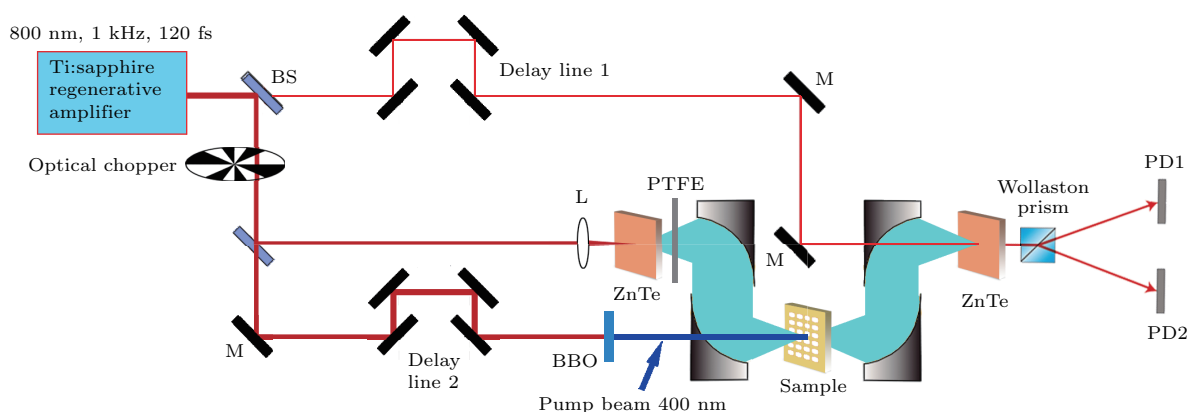


图 1 (网刊彩色) 光抽运-太赫兹探测光路示意图

Fig. 1. (color online) Experimental setup for optical pump-terahertz probe measurements.

3 结果与分析

图2为室温下ZnSe的紫外-可见吸收光谱. 从ZnSe室温下的吸收光谱可以看出, ZnSe对400 nm的光几乎是完全吸收的, 所以用中心波长为400 nm的抽运光激发ZnSe完全能够使电子从价带激发到导带.

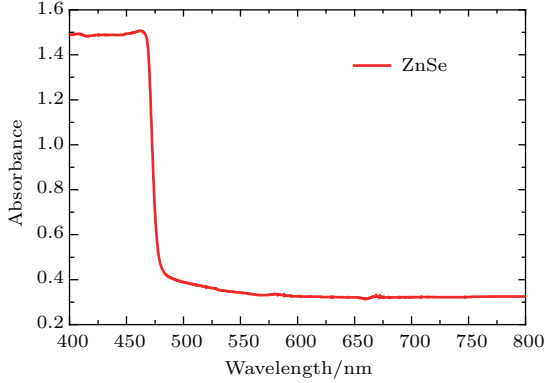


图2 ZnSe在室温下的吸收光谱

Fig. 2. The absorbance spectrum of ZnSe at room temperature.

首先, 我们用中心波长为400 nm的光激发ZnSe, 研究了不同抽运光密度激发下太赫兹脉冲峰值透过率的变化情况. 图3为不同抽运光密度作用下太赫兹脉冲峰值透过率随时间变化的归一化图. 从图3可以看出ZnSe中光激发载流子的复合过程与抽运光密度密切相关. 用双指数衰减函数对其进行拟合, 图3中实线为拟合结果, 其拟合数据如表1所列. 拟合结果显示, ZnSe的载流子复合过程分为两部分, 一部分为快的载流子复合过程, 另一部分为慢的载流子复合过程, 快的载流子弛豫时间为几十皮秒到上百皮秒, 慢的载流子弛豫时间为一个到几个纳秒. 慢的载流子弛豫时间和快的载流子弛豫时间均随抽运光密度的增加而增大. 快的载流子弛豫时间随抽运光密度增加而增大与样品中的缺陷有关, 随着激发光密度的增强, 激发的光生载流子浓度增大, 缺陷逐渐被光生载流子填满, 致使快的弛豫时间变大; 慢的弛豫时间随着抽运光密度增加会变大主要和带填充有关^[25-27].

我们还测量了同一抽运光波长(400 nm)、同一抽运光密度(240 μJ/cm²)、不同抽运光延迟时间下ZnSe的瞬态电导率变化谱. 把没有抽运光激发样品时测得的太赫兹时域光谱作为参考信号, 有抽运光激发样品时测得的太赫兹时域光谱作为样品信号, ZnSe的复电导率可以通过(1)式计算得到^[28]

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\omega) &= A e^{i\phi} = \frac{\tilde{E}_{\text{pump}}(\omega)}{\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)} \\ &= \frac{1+n}{1+n+Z_0\tilde{\sigma}(\omega)d}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, d 为样品趋肤深度, n 为没有光激发时的样品在太赫兹波段的折射率, $Z_0 = 377 \Omega$ 是自由空间阻抗, A 为有抽运光激发时的太赫兹信号和没有抽运光激发时的太赫兹信号在频谱上的强度之比, ϕ 为有抽运光激发的样品信号与没有抽运光激发的样品信号的相位差. 我们利用ZnSe没有抽运光激发时的太赫兹时域光谱计算了其在太赫兹波段的折射率, 如图4所示, 这与文献^[22]的结果相一致. 在ZnSe电导率计算中, 我们取其在1 THz处的折射率值约为2.95. ZnSe在400 nm处的消光系数约为0.29^[29]. 趋肤深度与消光系数的关系为

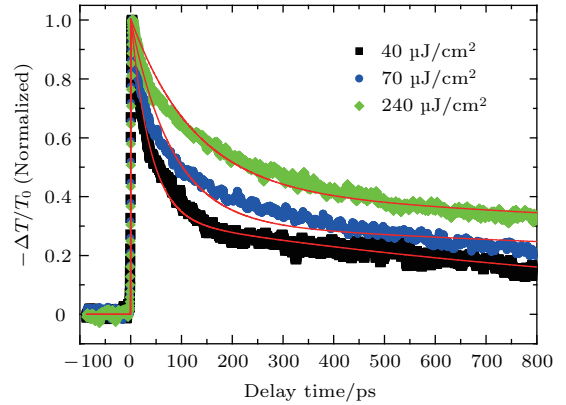


图3 (网刊彩色) 不同抽运光密度作用下太赫兹脉冲峰值透过率(归一化)随时间的变化, 图中实线为拟合结果

Fig. 3. (color online) The negative differential transmission ($-\Delta T/T_0$) (normalized) of the main peak of the terahertz probe pulse as a function of time delay with pump fluence of 40, 70 and 240 μJ/cm² for bulk ZnSe. Solid curves are biexponential fits.

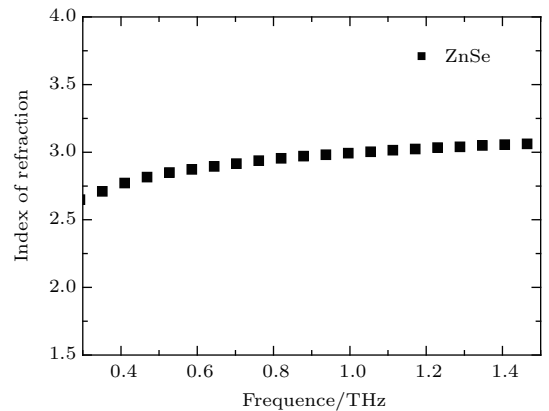


图4 ZnSe在太赫兹波段的折射率

Fig. 4. Refractive index of ZnSe in terahertz wave band.

$$d = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{4\pi\kappa}, \quad (2)$$

其中, α 为吸收系数, k 为消光系数, λ 为波长. 计算出 ZnSe 在 400 nm 处的趋肤深度约为 110 nm. 根据电导率计算公式和测得的在抽运光密度为 $240 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 激发下不同延迟时间的 ZnSe 的太赫兹时域光谱, 分别计算出了抽运光延迟时间为 2, 20 和 100 ps 时 ZnSe 电导率的实部和虚部, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 不同抽运光延迟时间下电导率的实部都是正的, 并且随着频率的增大而增大. 而不同抽运光延迟时间下电导率的虚部都是负的, 并且随着频率的增大而减小. 根据电导率实部和虚部的变化特点, 我们选用 Drude-Smith 模型对电导率的实部和虚部进行拟合, 其表达式为 [30]

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \frac{\varepsilon_0\omega_p^2\tau}{1 - i\omega\tau} \left(1 + \frac{c_1}{1 - i\omega\tau} \right), \quad (3)$$

式中, $\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m^*\varepsilon_0}}$ 是等离子体频率, N 是载流子浓度, 对于载流子浓度 N 可以利用公式 $N = (1 - R)E\alpha/(Ah\nu)$ 来计算, 其中 R 是垂直入射时的反射率, E 是单脉冲能量, A 是光照射在样品上的面积; τ 是散射时间, 即载流子的平均碰撞时间; m^* 是有效质量. 当 $c_1 = 0$ 时, 其表达式为 Drude 模型, 表示载流子完全是自由的; 当 c_1 取值在 -1 到 0 之间时, 该表达式表示不同程度的载流子的散射或者局域; 相应地, 当 $c_1 = -1$ 时, 表示载流子的完全逆向散射或完全局域. 图 5 中实线为 Drude-Smith 模型的拟合结果.

从图 5 可以看出, 光激发层的电导率用 Drude-Smith 模型能够基本拟合, 拟合参数如表 2 所列. 从 Drude-Smith 模型拟合结果可以看出, 随着抽运光延迟时间的增加, 载流子平均碰撞时间 τ 不断减小, c_1 也逐渐减小. 一般情况下, 高的载流子浓度导致载流子与载流子碰撞增强, 也就是说随着抽运光延迟时间的增加, 其载流子浓度逐渐减小, 平均碰撞时间应该增大. 载流子浓度与碰撞时间的反常依赖关系表明光激发载流子之间以反向散射为主. 负的 c_1 值也进一步说明了载流子之间碰撞以反向散射为主. 对于弹性碰撞来说, c_1 来自于 $\cos\theta$ 的值 (θ 是散射角). 负的 c_1 值表明, 电子系统所携带的静电流在恢复到其平衡值之前就反向了. 随着抽运光延迟时间的增加, c_1 值逐渐减小, 这时直流电导

逐渐占主流. 当抽运光延迟时间为 2 ps 时, c_1 值接近于 -1 , 这表明直流电导被抑制, 并且最大电导出现在高频位置. 因此, 光激发 ZnSe 引起的电导率色散关系不符合经典的 Drude 模型可能是块体材料中光激发载流子的反向散射引起的.

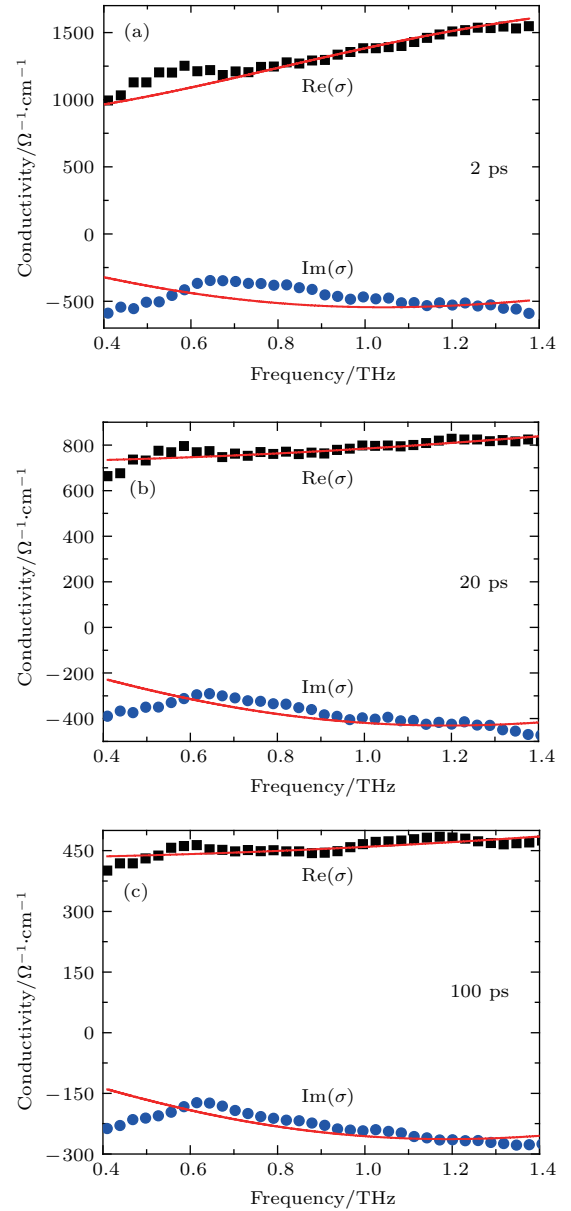


图 5 (网刊彩色) 不同抽运光延迟时间下 ZnSe 的电导率的实部和虚部 (a), (b) 和 (c) 分别是延迟时间为 2, 20, 100 ps 时电导率的实部 (黑色) 和虚部 (蓝色), 图中的实线为拟合结果

Fig. 5. (color online) Real and imaginary components of the complex terahertz conductivity of ZnSe at (a) 2 ps, (b) 20 ps, (c) 100 ps delay time after photoexcitation with a pump fluence of $240 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. Solid lines are fitting curves with Drude-Smith mode.

表1 不同抽运光密度激发下太赫兹脉冲峰值透过率随时间变化的双指数衰减函数拟合结果

Table 1. The fitting parameters with a biexponential function for pump fluence of 40, 70 and 240 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ with excitation at 400 nm.

Pump fluence/ $\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	τ_1/ps	τ_2/ps
40	38	1119
70	81	3434
240	125	4146

表2 不同抽运光延迟时间下, Drued-Smith 模型拟合参数

Table 2. The fitting parameters based on Drude-Smith model at different pump delay time with excitation fluence of 240 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

Delay time/ps	$\omega_p/(2\pi)/\text{THz}$	τ/fs	c_1
2	158	69	-0.99
20	298	19	-0.9
100	230	17	-0.85

4 结 论

本文利用光抽运-太赫兹探测技术研究了 ZnSe 的光致载流子动力学特性, 主要包括在中心波长 400 nm 的光激发下的 ZnSe 载流子弛豫过程和太赫兹波段电导率的时间演化过程. 在中心波长为 400 nm 的抽运光作用下, ZnSe 的载流子弛豫过程用双指数函数进行了很好的拟合, 其快的载流子弛豫时间和慢的载流子弛豫时间均随抽运光密度的增加而增大. 快的载流子弛豫时间随抽运光密度的增加而增大与样品中的缺陷有关, 随着激发光密度的增加, 激发的光生载流子浓度增大, 缺陷逐渐被光生载流子填满, 致使快的弛豫时间增大; 慢的载流子弛豫时间随着抽运光密度增加而增大主要和带填充有关. 不同抽运光延迟时间下 ZnSe 在太赫兹波段的瞬态电导率用 Drude-Smith 模型进行了很好的拟合. 对 ZnSe 光致载流子动力学特性的研究为高速光电器件的设计和制造提供了重要的实验依据.

参考文献

[1] Shah J 1996 *Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures* (New York: Springer) p132
 [2] Othonos A 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 1789
 [3] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, Heinz T F, Bonn M 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 543

[4] Li M, Wu B, Ekahana S A, Utama M I B, Xing G, Xiong Q, Sum T C, Zhang X 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 091104
 [5] Parkinson P, Dodson C, Joyce H J, Bertness K A, Sanford N A, Herz L M, Johnston B M 2012 *Nano Lett.* **12** 4600
 [6] Li G, Xue X, Lin X, Yuan S, Tang N, Chu F, Cui H, Ma G 2014 *Appl. Phys. A* **116** 45
 [7] Dakovski G L, Kubera B, Lan S, Shan J 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 139
 [8] Liu H, Lu J, Hao F T, Li D, Feng Y P, Tang S H, Chong H S, Zhang X 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 26036
 [9] Larsen C, Cooke G D, Jepsen P U 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1308
 [10] Park H, Kim W R, Jeong H T, Lee J J, Kim H G, Choi W Y 2011 *Sol. Energ. Mat. Sol. C* **95** 184
 [11] Liu H, Lu J, Zheng M, Chong H S 2013 *Nano Res.* **6** 808
 [12] Xue X, Jiang M, Li G, Lin X, Ma G, Jin P 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 193506
 [13] Tsokkou D, Othonos A, Zervos M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 133101
 [14] Haripadmam P C, John H, Philip R, Gopinath P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 221102
 [15] Kong D G, Ao G H, Gao Y C, Chang Q, Wu W Z, Ran L L, Ye H 2012 *Physica B* **407** 4251
 [16] Yao G X, Lü L H, Gui M F, Zhang X Y, Zheng X F, Ji X H, Zhang H, Cui Z F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 107801
 [17] Ku S A, Tu C M, Chu W C, Luo C W, Wu K H, Yabushita A, Chi C C, Kobayashi T 2013 *Opt. Express* **21** 13930
 [18] Lü Z, Zhang D, Zhou Z, Sun L, Zhao Z, Yuan J 2012 *Appl. Opt.* **51** 676
 [19] Ropagnol X, Morandotti R, Ozaki T, Reid M 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 174
 [20] He S, Chen X, Wu X, Wang G, Zhao F J 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 1519
 [21] Xu X L, Wang X M, Li F L, Zhang X C, Wang L 2004 *Spectrosc. Spect. Anal.* **24** 1153 [徐新龙, 王秀敏, 李福利, 张希成, 汪力 2004 光谱学与光谱分析 **24** 1153]
 [22] Han J G, Abul K A, Zhang W L J 2007 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **2** 222
 [23] Zhang X C, Jin Y, Ma X F 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2764
 [24] Wu Q, Zhang X C 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 3523
 [25] Sosnowski T S, Norris T B, Wang H H, Grenier P, Whitaker J F, Sung C Y 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 3245
 [26] Joseph S M, Prashant V K 2014 *Nat. Photon.* **8** 737
 [27] Price M B, Butkus J, Jellicoe T C, Sadhanala A, Briane A, Halpert J E, Bronch K, Hodgkiss M J, Friend H R, Deschler F 2015 *Nat. Commun.* **6** 8420
 [28] Hegmann F A, Ostroverkhova O, Cooke D G 2006 *Photophysics of Molecular Materials* (Weinheim: Wiley-VCH Press) p367
 [29] Palik 1998 *Handbook of Optical Constants of Solids* (Vol. 2) (Chestnut Hill: Academic Press) p752
 [30] Titova V L, Cocker L T, Cooke G D, Wang X Y, Meldrum A, Hegmann A F 2011 *Phys. Rev. B* **83** 085403

Photocarrier dynamics in zinc selenide studied with optical-pump terahertz-probe spectroscopy*

Li Gao-Fang^{1)2)†} Ma Guo-Hong³⁾ Ma Hong⁴⁾ Chu Feng-Hong¹⁾ Cui Hao-Yang¹⁾
Liu Wei-Jing¹⁾ Song Xiao-Jun¹⁾ Jiang You-Hua¹⁾ Huang Zhi-Ming²⁾ Chu Jun-Hao²⁾

1) (College of Electronic and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

2) (Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

3) (Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

4) (College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

(Received 13 October 2016; revised manuscript received 8 November 2016)

Abstract

Optical pump-terahertz (THz) probe spectroscopy is employed to investigate the photo-excited carrier relaxation process and the evolution of terahertz conductivity in ZnSe. With the pump pulse at a wavelength of 400 nm, the carrier relaxation process can be well fitted to a biexponential function. We find that the recombination process in ZnSe occurs through two components, one is the fast carrier recombination process, and the other is the slow recombination process. The fast carrier relaxation time constant is in a range from a few tens of picoseconds to hundreds of picoseconds, and slow carrier relaxation time constant ranges from one to several nanoseconds. We find that both the fast and the slow carrier relaxation time constant increase with the power density of pump beam increasing, which is related to the density of defects in the sample. Upon increasing the excitation power density, the defects are filled by the increased photo-excited carriers, which leads to an increase in the fast carrier relaxation time. While, the slow carrier relaxation time increasing with pump flux can be attributed to the filling of surface state. We also present the THz complex conductivity spectra of ZnSe at different delay times with a pump flux of 240 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. It is shown that the real part of the conductivity decreases with increasing the pump-probe delay time. The real part of the conductivity is positive and increases with frequency in each of the selective three delay times (2, 20, and 100 ps), while the imaginary part is negative and decreases with frequency. The transient conductivity spectra at terahertz frequency in different delay times are fitted with Drude-Smith model. According to the fitting results from Drude-Smith model, with the pump-probe delay time increasing, the average collision time τ and the value of c_1 decrease. Generally, a higher carrier density leads to a more frequent carrier-carrier collision, which means that the collision time should decrease with carrier density increasing. The abnormal carrier density dependence of collision time implies a predominance of backscattering in our ZnSe. The predominance of backscattering is also observed for the negative value of c_1 . The negative value of c_1 indicates that some

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11404207, 11674213), the Shanghai Natural Science Foundation, China (Grant No. 14ZR1417500), the Local Colleges and Universities Capacity Building Program of the Shanghai Science and Technology Committee, China (Grant Nos. 15110500900, 14110500900), the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. 15ZZ086), the Colleges and Universities Young Teachers Training Funding Program of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. ZZsd115106), and the Shanghai University of Electric Power Scientific Research Fund, China (Grant No. K2014-028).

† Corresponding author. E-mail: li_gaofang@163.com

photocarriers are backscattered in ZnSe. With a delay time of 2 ps, the value of c_1 approaches to -1 , which indicates that the direct current (DC) conductivity is suppressed, and the maximum conductivity shifts toward higher frequency. With increasing the delay time, the value of c_1 decreases: in this case DC conductivity dominates the spectrum. The study of the dynamics of photoinduced carriers in ZnSe provides an important experimental basis for designing and manufacturing the high speed optoelectronic devices.

Keywords: optical pump-terahertz probe, pump flux, photocarriers, transient conductivity

PACS: 72.20.Jv, 72.20.-i, 42.65.Re, 72.80.Ey

DOI: [10.7498/aps.65.247201](https://doi.org/10.7498/aps.65.247201)