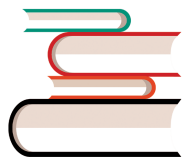


文章编号:1005-4642(2025)07-0019-08



课程·教材·教法

半导体瞬态反射光谱实验的教学设计与实践

侯文鑫^a,王誉焯^a,汪 波^b,王引书^a,常 青^b
(北京师范大学 珠海校区 a.文理学院;b.实验教学平台,广东 珠海 519087)

摘 要:瞬态反射光谱是研究材料表界面电荷动力学的有力工具. 本文设计了半导体材料如 Ge 和 GaAs 瞬态反射光谱的教学实验,旨在引导学生认识半导体材料的瞬态反射特性. 通过实验设计、装置搭建和实验数据分析等教学环节,使学生能够深入了解半导体材料的激发态动力学过程.

关键词:超快光学;半导体特性;实验教学;瞬态反射光谱

中图分类号:G642.423;O433

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.004

1 现状分析

半导体材料是现代微电子技术和信息化社会的基础. 通过研究半导体材料的物理性能,学生可以将抽象的理论应用在具体的材料研究中,从而加深对半导体物理概念的理解. 目前的实验教学中,半导体材料的霍尔效应、光伏效应、 $I-V$ 特性、吸收和透射光谱^[1-2]等实验内容,为学生深入认识载流子浓度、迁移率、光电转换、能带结构等半导体特性提供了较大的帮助^[3]. 但这些实验对载流子输运和表界面超快动力学过程研究不够深入,因此需要设计进阶实验内容以弥补其不足.

瞬态光谱技术近年来在物理^[4]、化学^[5]、材料^[6]、生物^[7]等研究领域中被广泛应用. 基于光泵浦超白光连续探测原理的超快瞬态反射光谱仪可以实现对半导体材料中电子伏特(eV)能量尺度上的超快变化进行探测^[8-10],从而弥补了现有探测技术在载流子动力学和光吸收特性方面的不足.

尽管瞬态反射光谱(Transient reflection spectroscopy, TRS)在科研中的重要性日益提升,但国内较少在教学中开展瞬态光谱实验. 在国家大力发展新工科背景下,将前沿的半导体材料测试技术引入近代物理实验课程教学工作

中^[11-13],有利于开阔学生的视野,提高学生的综合素质. 通过超快瞬态反射光谱实验,学生可以更好地了解 and 掌握半导体材料的表界面超快动力学过程和热电子动力学等基础知识^[14-16].

2 教学目标

半导体材料测试实验设计了如下教学目标:

- 1)学生能够掌握 TRS 系统的基本构造及原理,并能够正确使用 TRS 系统完成实验测量.
- 2)学生能够掌握 TRS 全谱的分析方法和载流子动力曲线的拟合模型,并理解模型的物理意义.
- 3)学生能够通过分析 TRS 全谱与载流子动力学曲线研究半导体材料特性,推导半导体的固体物理学参数,从而获得能带结构等全谱信息和载流子扩散、表界面复合等动力学信息,了解半导体材料的激发态动力学过程.
- 4)学生能够运用固体物理学知识从实验结果中分析得出 Ge 和 GaAs 的应用性能,并进行比较,从而发现其共性与差异.
- 5)拓宽学生对物理前沿知识的了解,增强学生对半导体相关知识的学习兴趣,使学生能够通过本次实验加深对半导体发展的了解,增强理论联系实际的能力.

收稿日期:2024-08-25;**修改日期:**2025-03-20

基金项目:北京师范大学教育教学改革类项目(No. jx2024084)

作者简介:侯文鑫(2005—),男,广东梅州人,北京师范大学珠海校区文理学院 2023 级本科生. E-mail:202311039153@mail.bnu.edu.cn

通信作者:常 青(1990—),女,河南周口人,北京师范大学珠海校区实验教学平台实验师,博士,研究方向为超快光学与实验教学研究. E-mail:qc@bnu.edu.cn

3 教学内容设计与实施

3.1 实验原理

3.1.1 TRS

TRS 中使用探测光检测光泵浦后材料反射光谱的变化,从而获得材料的有关电子能带结构、载流子动力学、杂质缺陷、原子振动等多方面信息的光谱技术^[17]. 在反射光谱中,反射系数 R 是描述材料表面反射信息的重要参数,被定义为反射

$$\begin{cases} R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{E_R E_R^*}{E_0 E_0^*} = \frac{(n-1-i\kappa)(n-1+i\kappa)}{(n+1+i\kappa)(n+1-i\kappa)} = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}, \\ \tan \theta = \frac{2\kappa}{n^2 + \kappa^2 - 1}, \end{cases} \quad (2)$$

通过 R 与 θ 间类似的克喇末-克朗尼格(Kramers-Krönig)关系,可以通过实验测得的 R 推导得到 θ ,从而代入式(2)解出 $\tilde{n}$ 的实部 n 与虚部 κ . 在瞬态反射系统中,光从空气垂直射入电介质且变化时间很短的情况下,有如下近似^[19]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{4\Delta\tilde{n}}{n^2 - 1}, \quad (3)$$

则 $\frac{\Delta R}{R}$ 正比于 $\Delta\tilde{n}$,而在其他入射角度时, $\frac{\Delta R}{R}$ 也近似正比于 $\Delta\tilde{n}$ (系数与探测光的入射角度和偏振有关). 而材料的吸收系数 α 与吸光度 A 可以由 $\tilde{n}$ 的虚部 κ 转化得到^[17],且均满足正比关系:

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

$$a = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = \alpha x, \quad (5)$$

其中 λ 为探测波长, x 为入射深度, I 为该深度下的光强, c 为光速, ω 为频率, I_0 为入射光强.

综上通过 TRS 测得材料反射系数随时间与探测波长的变化后,可得到材料复折射率 $\tilde{n}$ 相关系数的变化,进一步获得材料电子能带结构、载流子动力学、杂质缺陷、原子振动等多方面信息.

3.1.2 能带结构

半导体的能带结构对其电子器件的应用至关重要. 例如,在太阳能电池中,光生载流子的弛豫过程与带隙结构密切相关^[20-21]. 能带可以分为导带和价带,导带是电子能够自由移动的最高能量状态,位于空带的最下面. 价带是空穴能够自由移动的最低能量状态,位于满带的最上面. 而带隙是导带和价带之间的能量区域,电子不存这个

光强 I_R 与入射光强 I_0 之比: $R = \frac{I_R}{I_0}$, 根据菲涅耳定理,入射和反射电磁波的电场分量的振幅之比满足^[18]:

$$\frac{E_R}{E_0} = \frac{n-1-i\kappa}{n+1+i\kappa}, \quad (1)$$

其中 E_R 为反射电磁波电场分量的振幅, E_0 为入射电磁波电场分量的振幅,而系数 n 和 κ 分别是复折射率 $\tilde{n} = n + i\kappa$ 的实部与虚部. 通过进一步推导,可以得到 R 与 $\tilde{n}$ 之间的关系^[19]:

区域^[18],如图1所示.

实验中2种样品在室温(300 K)下的能隙如表1所示^[18].

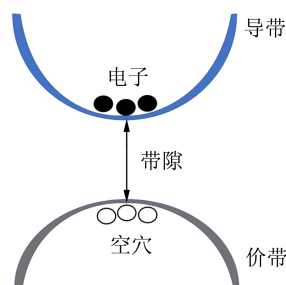


图1 能带结构示意图

表1 实验样品 Ge、GaAs 的能隙和带隙类别

样品晶体名称	E_g/eV	带隙
Ge	0.66	间接带隙
GaAs	1.424	直接带隙

3.1.3 反射光谱

材料的反射系数用于描述材料表面对特定波长光的反射能力,与材料的能带结构、杂质浓度和温度等因素有关. 通过测量半导体材料反射系数对延迟时间的依赖关系可以得到半导体材料的反射光谱动力学曲线,进而分析获得其能带结构、杂质浓度、晶体质量和光电特性等的重要信息.

对于 TRS 全谱,其各峰或拐点往往对应于材料的各联合态密度奇点. 联合态密度是指在给定的探测角频率 ω 下,波矢 k 和自旋相同,而能量间隔为 $\hbar\omega$,分属2个带的状态对数密度,满足:

$$J_{cv}(E) = \frac{2}{(2\pi)^3} \int_{E_c - E_v = E} \frac{ds}{|\nabla[E_c(\mathbf{k}) - E_v(\mathbf{k})]|}, \quad (6)$$

当 $\mathbf{k}$ 满足 $\nabla E_c(\mathbf{k}) - \nabla E_v(\mathbf{k}) = 0$ 时, $J_{cv}(E)$ 发散, 则出现联合态密度奇点(或称为临界点). 该点对应的带间能量称为临界点能量, 表示为 $E_0 = E_c(\mathbf{k}) - E_v(\mathbf{k})$, 即在这一能力值下, 联合态密度 $J_{cv}(E)$ 呈现 1 个拐点(即联合态密度奇点). 故而通过 TRS 各峰或拐点对应的探测光子能量, 可以获得材料的能带结构信息.

TRS 动力学曲线, 反映了在固定的探测波长下, 载流子受激后的弛豫过程, 由于基态漂白, 激发态吸收, 受激辐射等过程导致材料光吸收的改变^[22-23], 致使 TRS 时间尺度上的变化. 通过式(2)可以获得 $\tilde{n}$ 的各系数变化, 进而间接获取材料的光吸收变化, 从而得到材料的载流子寿命等光电特性信息.

3.2 实验装置

3.2.1 2 种半导体样品

第 1 代半导体以 Si, Ge 材料为主, 其特点是饱和电子速率和电子迁移率及击穿电压都相对较低^[24]; 第 2 代半导体材料以 GaAs 材料为主, 其特点是具备高电子迁移率和饱和电子速率以及较高的临界击穿电压, 且禁带宽度较大^[25]. 本实验使用 TRS 获得半导体材料 Ge 和 GaAs 的光泵浦响应特征, 得到 2 代半导体之间的参数与性质上的差别, 使学生深入了解半导体材料的激发态动力学过程.

3.2.2 瞬态反射光路

典型的 TRS 系统的设置如图 2 所示.

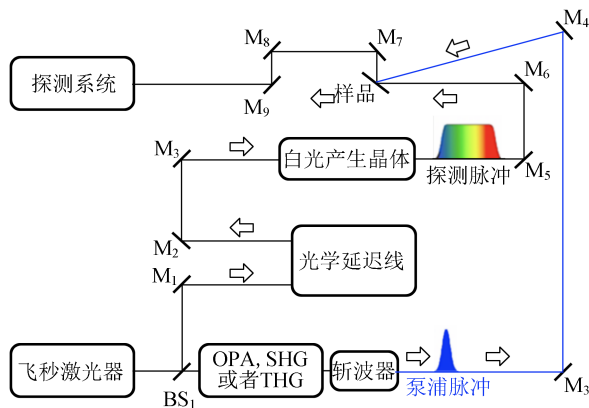


图 2 典型 TRS 系统光路示意图

飞秒激光光束在经过分束器(BS)后被分成 2 部分: 一路用于泵浦样品, 另一路用于产生超连续白光(WLG). 在泵浦光束路径中, 光参量放大器(OPA)、二次谐波产生(SHG)系统和三次谐波产生(THG)系统可以被用来改变泵浦光束的波长. 而利用探测光路中的光学延迟线可以控制泵浦脉冲与 WLG 探测脉冲之间的延迟时间. 在氟化钙等非线性晶体的帮助下产生 WLG, 其覆盖范围从可见光到近红外波段. WLG 探测脉冲与泵浦脉冲重叠于样品表面, WLG 光束在通过样品的反射后, 被由电荷耦合器件构成的探测系统探测^[26].

3.2.3 TRS 的测量系统

在瞬态反射系统中, 泵浦光路中的斩波器用于调制泵浦光束. 探测系统可以探测到有激光脉冲激发和没有激光脉冲激发下的样品状态, 并依次记为 $I_{on}(\lambda, \tau)$ 和 $I_{off}(\lambda, \tau)$ (下标中 on 和 off 表示有和没有激发的状态), 而相应的强度光谱可以作为能量的函数被表示为 $I_{on}(\hbar\omega, \tau)$ 和 $I_{off}(\hbar\omega, \tau)$, $\hbar\omega$ 为探测能量.

通过给定样品的人射光参考强度光谱和反射光强度光谱, 定义反射系数

$$R(\hbar\omega) = \frac{I_R(\hbar\omega)}{I_1(\hbar\omega)}, \quad (7)$$

其中, $I_1(\hbar\omega)$ 是入射光的强度, $I_R(\hbar\omega)$ 是反射光的强度. 而泵浦-探测时间延迟 $\tau [\Delta A(\hbar\omega, \tau)]$ 下的激光激发导致的 R 的瞬态变化可以通过下式获得^[17]:

$$\Delta R(\hbar\omega, \tau) = \frac{I_{on}^R(\hbar\omega, \tau)}{I_1(\hbar\omega, \tau)} - \frac{I_{off}^R(\hbar\omega, \tau)}{I_1(\hbar\omega, \tau)} = \frac{I_{on}^R(\hbar\omega, \tau) - I_{off}^R(\hbar\omega, \tau)}{I_1(\hbar\omega, \tau)}, \quad (8)$$

其中, $I_1(\hbar\omega, \tau)$ 为探测时间延迟 τ 下的入射光强, $I_{on}^R(\hbar\omega, \tau)$ 与 $I_{off}^R(\hbar\omega, \tau)$ 分别为探测时间延迟下有激光脉冲激发与无激光脉冲激发的反射光强, 定义

$$R_{on}(\hbar\omega, \tau) = \frac{I_{on}^R(\hbar\omega, \tau)}{I_1(\hbar\omega, \tau)}, \quad (9)$$

$$R_{off}(\hbar\omega, \tau) = \frac{I_{off}^R(\hbar\omega, \tau)}{I_1(\hbar\omega, \tau)}, \quad (10)$$

则进一步可以推导得到^[17]

$$\frac{\Delta R(\hbar\omega, \tau)}{R(\hbar\omega, \tau)} = \frac{R_{on}(\hbar\omega, \tau) - R_{off}(\hbar\omega, \tau)}{R_{off}(\hbar\omega, \tau)} = \frac{I_{on}^R(\hbar\omega, \tau) - I_{off}^R(\hbar\omega, \tau)}{I_{off}^R(\hbar\omega, \tau)}, \quad (11)$$

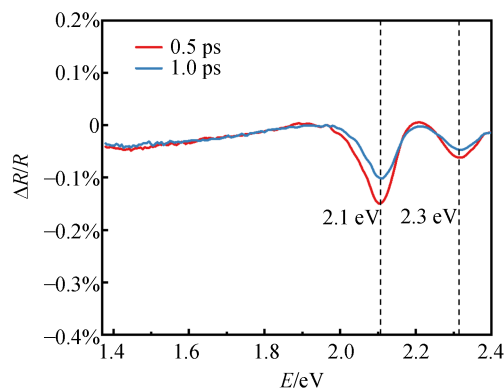
因此,瞬态反射数据 $\Delta R(\hbar\omega, \tau)/R(\hbar\omega, \tau)$ 是二维矩阵,行数据对应在特定的时间延迟 τ 下的 $\Delta R(\hbar\omega)/R(\hbar\omega)$,而列数据对应在特定的探测光能量下的动力学曲线 $\Delta R(\tau)/R\tau$.

3.3 先导实验

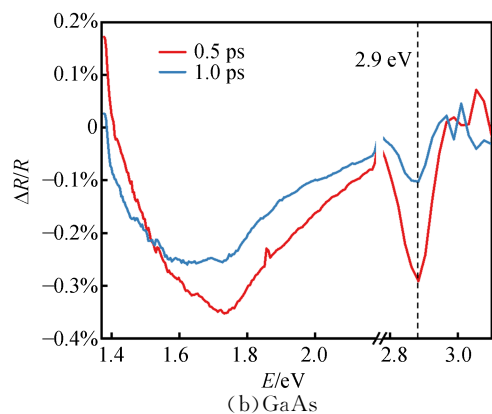
本次实验内容分为 2 个部分:

3.3.1 固定延迟时间下各样品瞬态反射率变化全谱的测量及对比

通过瞬态反射光谱系统测量固定延迟时间下 Ge 和 GaAs 样品的瞬态反射变化比值随探测光子能量的变化,得到瞬态反射率变化全谱图. 在图 3(a)中,Ge 的瞬态反射变化比值的绝对值 $|\Delta R/R|$ 在探测光子 1.4 eV 附近达到极大值,其反射率变化较快位置在小于 1.4 eV 处,这与该材料小于 1 eV 的特征相符. 即 Ge 的瞬态反射率在红外及近红外光波段变化较大,而 GaAs 的 $|\Delta R/R|$ 在探测光子 1.6 eV 附近达到极大值,如图 3(b)中虚线位置,即 GaAs 的瞬态反射率主要在可见光波的红光波段(1.4~1.6 eV)变化较大,说明 Ge 的禁带宽度比 GaAs 小.



(a) Ge

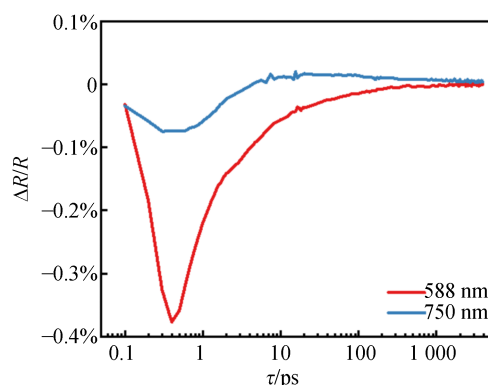


(b) GaAs

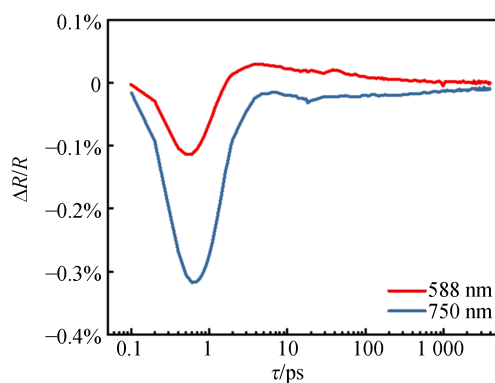
图 3 GaAs 与 Ge 在 0.5 ps 与 1.0 ps 的 TRS 全谱 (虚线处为奇点位置)

3.3.2 相同波长下各样品动力学曲线测量与对比

通过瞬态反射光谱系统测量相同探测波长下 Ge 和 GaAs 样品的瞬态反射变化比值随延迟时间的变化,得到瞬态反射光谱动力学曲线如图 4 所示,无论在 588 nm 还是 750 nm 的探测波长下,Ge 弛豫所需的时间都比 GaAs 弛豫所需的时间长^[27-28],说明 Ge 的载流子寿命在这 2 个波段下比 GaAs 长.



(a) Ge



(b) GaAs

图 4 Ge 与 GaAs 在 588 nm 与 750 nm 探测波长下的瞬态吸收光谱动力学曲线

3.4 主干实验

通过瞬态反射光谱系统分别测量 Ge 和 GaAs 样品在特定探测波长下的瞬态反射变化比值随延迟时间的变化,得到不同样品在该特定波长下的瞬态反射光谱动力学曲线,并利用其研究样品瞬态反射率的时间演化细节,得出相应的实验结论,如图 5 所示,其中纵坐标为 $\Delta R/R = [R(\lambda, t) - R_0(\lambda)]/R_0(\lambda)$, $R_0(\lambda)$ 为静态下的反射率.

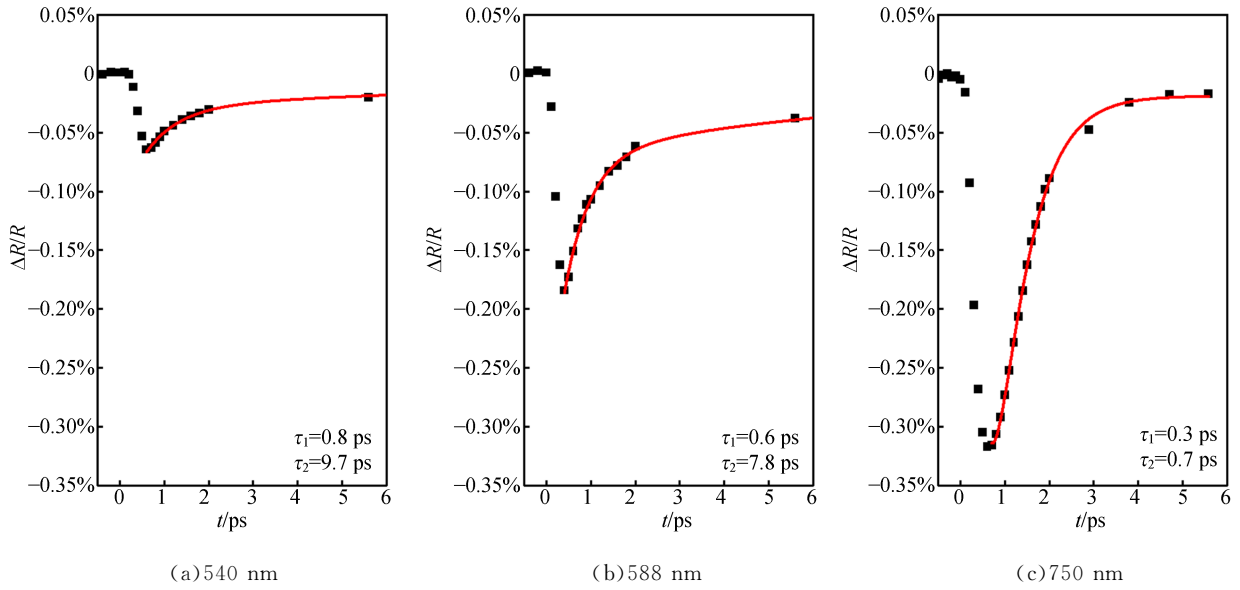


图 5 Ge 在探测光波长为 540 nm 和 588 nm 与 GaAs 在探测光波长为 750 nm 下的动力学曲线

对于解释该时间演化细节的模型,让学生使用类比于 Si 的瞬态反射率时间演化的解释模型框架^[29],研究本文所选的 2 种半导体瞬态反射率的时间演化,需要考虑到以下因素的贡献:

- 1) 自由载流子的注入;
- 2) 由于电子-声子能量交换导致的晶格加热效果;
- 3) 由于电子-声子能量交换导致的填充状态效果。

在本模型中这 3 个因素主要通过将瞬态反射率变化量拆分为 2 个分量进行表达。

第 1 个分量为主要与载流子数量相关的瞬态反射率变化量 ΔR_N ,主要描述自由载流子和填充状态的总作用效果,给定频率 f 和波长 λ ,其与激发态下的载流子随时间的数量变化 ΔN 成正比^[29]:

$$\Delta R_N = -C_N \Delta N(t) \lambda^2, \quad (12)$$

式中, λ^2 是与波长紧密相关的参数项,直接关系到通过 Drude 近似计算模型后的自由载流子对介电常数变化量的贡献;而其另一个参数 $\Delta N(t)$ 是初始泵浦激励后自由载流子数量的衰减变化,可通过指数衰减模型对其进行表示:

$$\Delta N(t) = \frac{e^{-\frac{t}{\tau_1}} + C e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{1 + C}, \quad (13)$$

其中 τ_1, τ_2 是 2 个时间常数, τ_1 主要与电子-声子的能量交换有关, τ_2 与其他弛豫过程有关, 2 者均与载流子寿命成正相关, 常数 C 是其权重系数。

第 2 个分量是主要与晶格温度相关的瞬态反射率变化量 ΔR_T ,该分量与具有时间和泵浦通量依赖性的晶格温度变化 $\Delta T(t, F)$ 成正比^[29]。

由于瞬态反射率变化量的第 2 分量 ΔR_T 的影响可以忽略,故而只考虑 ΔR_N 的影响,即通过式(12)和式(13)对各样品的动力学曲线进行拟合。

通过双指数拟合可得,Ge 弛豫过程的时间常量($\tau_1 \approx 1 \text{ ps}, \tau_2 \approx 10 \text{ ps}$)相较 GaAs 较大($\tau_1 \approx 0.5 \text{ ps}, \tau_2 \approx 1 \text{ ps}$),通过模型理论可推断出室温下 Ge 的载流子寿命较长, GaAs 较短,与先导实验的结论和实际结果相符合。这意味着在其半导体性能方面, GaAs 的载流子寿命较短,其制备的半导体中的自由载流子(电子或空穴)会更快地重新组合,使得其具有更快的响应速度和更高的频率响应,并且可以限制自由载流子在半导体中的扩散距离,这也是 GaAs 成为当前主流射频半导体的原因。而 Ge 的载流子寿命较长,其制备的半导体光生载流子的捕获概率较高,从而具有更高的能源转换效率,对太阳能电池等光电器件的转换效率有显著影响,故而以 Ge 为例的 1 代半导常用于光伏发电^[30]。

同时,通过对图 3 中瞬态反射率全谱的分析可得:在近红外和红外波段, Ge 的瞬态反射率变化较大,而在可见光波段则变化较小,其特征能级对应的波长在红外光谱范围内。在红光波段, GaAs 的瞬态反射率变化相对较大,其特征能级

对应的波长在可见光谱的近红外范围。

在带隙能量层面,Ge 的带隙能量较低,可以探测到较长波长的红外光,包括近红外和中红外光谱范围,且对于该波段下的辐射较为敏感,故而适用于红外光探测器^[21]。而 GaAs 的带隙能量较高,为直接带隙材料,在光激发后,激发的光子能量几乎完全转化为电子和空穴对的能量,提高了载流子迁移率,使得光电转换效率更高,使其成为优秀的光电转换材料和高频器件材料^[20]。

3.5 进阶实验

通过具体研究选定时间常数下的瞬态反射率全谱,找出探测波长范围内材料对应的联合态密度奇点,并以此解释这些联合态密度奇点反映的材料如带隙等的能带理论信息(图 3)。

通过图 3 得知 Ge 与 GaAs 的相关能带结构:Ge 的 TRS 在探测光子能量为 2.1 eV 与 2.3 eV 处出现峰值,即 2.1 eV 与 2.3 eV 分别作为 Ge 的 2 个奇点^[31],这 2 个奇点对应 Ge 跃迁能量为 2.2 eV 的 L_3' 价带向 L_1 价带的跃迁行为^[32],而双峰 0.2 eV 的差距则源于自旋轨道分裂。而 GaAs 的 TRS 在探测光子能量为 2.9 eV 处出现峰值,即为 GaAs 的奇点,该奇点对应 GaAs 跃迁能量为 2.9 eV 的布里渊 A 区点附近 $L_{4,5}$ 价带向 L_6 导带的跃迁行为^[33]。

综上所述,通过让学生使用类比于 Si 的瞬态反射率时间演化的解释模型框架,并对其实验数据进行解析,可以得到以上的实验结论,即第 1 代和第 2 代半导体性能的不同及其背后的原因。最后,可以通过学生实验报告或课堂分享的情况考查学生对实验及相关知识的掌握情况,教学评估分为以下部分:

1)对 TRS 原理及作用的掌握程度及对 TRS 系统工作原理的理解。

2)对 2 代半导体相关固体物理学知识的掌握程度,可以要求学生通过其固体物理学知识推导出 2 代半导体的应用性能,并进行比较。

3)考查学生运用实验结果和解释模型,通过瞬态反射率全谱和动力学曲线推导半导体相关的固体物理学参数,从而评估学生将光学和固体物理学联结运用的能力。

4 教学效果

通过调查问卷的方式获得了本校三年级学生

对该教学设计的评价,其结果如图 6 所示。首先,在实验原理方面,大部分学生认为该实验原理的难度不高,学生普遍认为基于已学的光学及固体物理学知识,可以较快地理解实验原理,并掌握 TRS 系统的基本构造及原理。该实验能有效激发学生将所学的光学与固体物理学知识相结合并运用于具体实验。其次,在实验装置方面,大部分学生认为该实验装置的使用难度适中,需要细心与耐心才能完成实验操作。经过学习该实验,学生能够正确使用 TRS 系统完成实验测量,同时学生的实验观察能力与动手能力得到有效提升。最后,在数据分析方面,大部分学生认为通过该模型分析得出正确结论的难度适中,学生普遍相信能够通过解释模型及已学的固体物理学知识分析半导体特性并得出结论,且认为通过该实验可以锻炼数据处理技能,提升科学思维能力、数据处理以及分析能力。

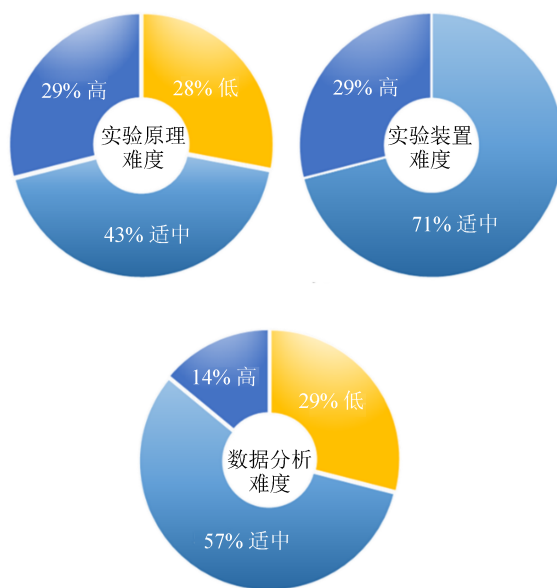


图 6 教学效果问卷反馈

综上所述,半导体 TRS 实验作为近代物理进阶实验课程的重要组成部分,其难度设置适合。在课程体系中引入该实验项目,不仅能够显著提升学生的科研兴趣,还可有效强化其理论知识向实践应用的转化能力。

5 结束语

为了弥补现有探测技术在载流子动力学和光

吸收特性方面的不足,本文通过使用 TRS 测量 Ge 和 GaAs 的瞬态反射率全谱和动力学曲线,使学生了解 Ge 和 GaAs 之间的参数与性质上的差别,加深对载流子动力学和光吸收特性知识的理解。通过学习 TRS 系统的工作原理与相应数据处理方法,可以进一步拓宽学生的视野,提高学生的核心素养,增强学生对半导体表面界面基础知识的理解。对 TRS 数据进行分析,可以促使学生们重构融合光学知识与半导体物理知识,增强学生的跨学科思维能力和多学科的综合应用能力。最后,通过对比研究 Ge 和 GaAs 的物理特性,分析并比较其可行应用,能够有效增强学生理论联系实际的能力。对于有意向在相关物理学领域深造的学生,完成该实验内容能够为他们将来更好地开展科研工作奠定基础;而对于师范生而言,他们在学习该实验后,能够在将来的教学中进行趣味科普,拓宽学生对物理前沿知识的了解,为物理学人才培养做出贡献。

参考文献:

- [1] 孙文博,王合英,郑盟锐,等. 饱和吸收光谱实验的教学定位与教学设计[J]. 物理实验,2021,41(9): 29-34.
- [2] 姜玺阳,王飞飞,周伟,等. 飞秒激光与材料相互作用中的超快动力学[J]. 中国激光,2022,49(22):7-27.
- [3] ZUCCA R R L, SHEN Y R. Wavelength-modulation spectra of some semiconductors [J]. Physical Review B, 1970,1(6):2668-2676.
- [4] SABBAH A J, RIFFE D M. Measurement of silicon surface recombination velocity using ultrafast pump-probe reflectivity in the near infrared [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(12): 6954-6956.
- [5] 周庆,陈昕昕,谢俊涵,等. 三种状态态的三重态吸收性质研究 [J]. 半导体光电,2023,44(6):863-868.
- [6] FU J H, XU Q, HAN G F, et al. Hot carrier cooling mechanisms in halide perovskites [J]. Nature Communications, 2017,8(1):1300.
- [7] BERERA R, GRONDELLE R V, KENNIS J T M. Ultrafast transient absorption spectroscopy: Principles and application to photosynthetic systems [J]. Photosynthesis Research, 2009,101(2):105-118.
- [8] ANDREAS O. Probing ultrafast carrier and phonon dynamics in semiconductors [J]. Journal of Applied Physics, 1998,83(4):1789-1830.
- [9] HUO C F, YUN T T, YAN, X Q, et al. Thickness-dependent exciton relaxation dynamics of few-layer rhenium diselenide [J]. Chinese Physics B, 2023,32(6):067203.
- [10] 崔云鹏,毕芷瑄,杨鲁懿. 半导体自旋的超快动力学研究[J]. 物理实验,2024,44(8):1-10.
- [11] 辛巍,仲玮恒,王晓颖,等. 低维 GaS 高响应度纸基光电探测器[J]. 物理实验,2024,44(4):7-11,24.
- [12] 李晓伟,董海鹏,石丽缘. 基于 ZnO 中空纳米纤维的甲醛气体传感器研究[J]. 物理实验,2023,43(12):12-19.
- [13] 赵晓丽,于宏岩,石一君,等. 基于聚合物共混的有机场效应晶体管光电性能研究[J]. 物理实验,2023,43(2):20-25.
- [14] MA J, MIAO T J, TANG J. Charge carrier dynamics and reaction intermediates in heterogeneous photocatalysis by time-resolved spectroscopies [J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51(14): 5777-5794.
- [15] AUSTON, D H, MCAFEE, S R., SHANK C V, et al. Picosecond spectroscopy of semiconductors [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 21: 147-150.
- [16] ROSSI F, KUHN T. Theory of ultrafast phenomena in photoexcited semiconductors [J]. Reviews of Modern Physics, 2002,74(3):895-950.
- [17] 杨晔. 瞬态反射光谱研究半导体表面界面载流子动力学的3种常见分析方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020,59(5):879-891.
- [18] 黄昆,韩汝琦. 固体物理学[M]. 北京:高等教育出版社,1988:153-172,325-333,437-442.
- [19] GUNNELL A R, ZGRABLIC G, GIANGRISOTOMI E, et al. Ultrafast reflectivity dynamics of highly excited Si surfaces below the melting transition [J]. Physical Review B, 2016, 94(15): 155427.
- [20] YANG, J L, LIU, K W, CHEN X, et al. Recent advances in optoelectronic and microelectronic devices based on ultrawide-bandgap semiconductors [J]. Progress in Quantum Electronics, 2022, 83(10): 100397.
- [21] THAMER A, TABBACH R, ALJOHANY M, et al. Post-transition metals [M]. Rijeka: IntechOpen, 2020:5.
- [22] ESPINOZA S, RICHTER S, REBARZ M, et al.

- Transient dielectric functions of Ge, Si and InP from femtosecond pump-probe ellipsometry [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(35): 21807-21816.
- [23] 阮刚, 黄均鼎, 徐元华. 神化镓半导体器件[J]. *电子技术*, 1965(12): 5-8.
- [24] 黄志伟, 汪建元, 黄巍, 等. 锗近红外光电探测器制备工艺研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 48-55.
- [25] ZHANG B, NIE Z G, WANG B, et al. Ultrafast carrier relaxation dynamics of photoexcited GaAs and GaAs/AlGaAs nanowire array [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, 22(44): 25819-25826.
- [26] ZHANG J, ZHU B, ZHANG L, et al. Femtosecond transient absorption spectroscopy investigation into the electron transfer mechanism in photocatalysis [J]. *Chemical Communications*, 2023, 59(6): 688-699.
- [27] WELLS N, BELDEN P, DEMERS J, et al. Transient reflectivity as a probe of ultrafast carrier dynamics in semiconductors: A revised model for low-temperature grown GaAs [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(7): 073506.
- [28] JANI H, DUAN L. Time-frequency spectroscopy of GaAs transient dispersion using few-cycle pump-probe reflectometry [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(5): 054010.
- [29] CICCO D A, POLZONI G, GUNNELLA R, et al. Broadband optical ultrafast reflectivity of Si, Ge and GaAs [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 17363.
- [30] 董汝昆, 吴绍华, 王柯, 等. 锗单晶材料的发展现状[J]. *红外技术*, 2021, 43(5): 510-515.
- [31] RICHARD S, ANIEL F, FISHMAN G. Energy-band structure of Ge, Si and GaAs: A thirty-band k. p method [J]. *Physical Review B*, 2004, 70(23): 235204.
- [32] MICHAEL Z, CHANG H T, BORJA L J, et al. Direct and simultaneous observation of ultrafast electron and hole dynamics in germanium [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15734.
- [33] 刘雪璐, 吴江滨, 罗向东, 等. 半绝缘 GaAs 的双调制反射光谱研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(14): 423-431.

Teaching design and practice of semiconductor transient reflection spectroscopy experiments

HOU Wenxin^a, WANG Yuzhuo^a, WANG Bo^b, WANG Yinshu^a, CHANG Qing^b

(a. School of Arts and Sciences; b. Experimental Teaching Platform, Zhuhai Campus, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

Abstract: Transient reflection spectroscopy (TRS) is a powerful tool for studying the charge dynamics on the surfaces and interfaces of materials. This paper designs a teaching method for TRS experiments of semiconductor materials like Ge and GaAs, aiming to guide students in understanding the transient reflection properties of semiconductor materials. Through constructing teaching segments covering experimental setup, procedure design, and data analysis, students could gain an in-depth understanding of the excited-state dynamic processes of semiconductor materials.

Key words: ultrafast optics; semiconductor properties; experimental teaching; transient reflection spectroscopy

[编辑: 郭 伟]