

基于反射光谱的 InGaAs/InGaSb T2SL 材料薄膜干涉特性研究

王啸臻^{1,2}, 谭智勇^{1,2}, 李建梅^{1,2}, 曹俊诚^{1,2}, 陈意桥^{1,2,3,*}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050; 2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049; 3. 苏州焜原光电有限公司, 苏州 215211)

摘要: 作为红外探测器的关键材料体系, II 类超晶格(type-II strained-layer superlattice, T2SL) 通过在物理上实现电子与空穴的空间分离, 有效抑制了非辐射复合过程。然而, 这也导致其电子-空穴波函数交叠较低, 使得材料通常表现出较弱的吸收系数。在此背景下, T2SL 多层结构中的薄膜干涉效应尤为显著, 而针对此类多层膜系的解析研究仍相对有限。本文采用傅里叶变换红外光谱仪的反射谱测量方法, 对以 T2SL 为核心的多层膜结构进行了系统研究。实验结果表明, 同质外延生长的缓冲层与衬底之间难以形成光学清晰的界面, 因而不会与 T2SL 吸收层发生明显的干涉耦合。这一发现不仅为 T2SL 器件光学仿真中缓冲层的合理简化提供了依据, 也为分析薄膜干涉对材料及器件性能的影响奠定了实验基础。此外, 本研究基于薄膜干涉现象, 实现了对 InAs 基 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ T2SL 材料在 $5\,000\sim 1\,000\text{ cm}^{-1}$ 波段折射率的初步提取, 所得平均折射率约为 3.7。

关键词: T2SL; 傅里叶光谱学; 薄膜干涉; InGaAs/InGaSb; 反射光谱

中图分类号: TN213

文献标志码: A

DOI: 10.3724/jfmd.2512104

CSTR: 32180.14.jfmd.2512104

Investigation of the thin-film interference properties of InGaAs/InGaSb type-II superlattice materials based on reflection spectroscopy

WANG Xiaozhen^{1,2}, TAN Zhiyong^{1,2}, LI Jianmei^{1,2}, CAO Juncheng^{1,2}, CHEN Yiqiao^{1,2,3,*}

(1. State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Acken Optoelectronics Ltd., Suzhou 215211, China)

Abstract: As a critical material system for infrared detectors, T2SL effectively mitigates non-radiative recombination by spatially separating electrons and holes. However, this separation also reduces the overlap between electron and hole wave functions, typically resulting in a diminished absorption coefficient. In this context, thin-film interference effects become highly significant in T2SL multilayer

收稿日期: 2025-12-30; 修订日期: 2026-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U2241227, No. 12393834, No. 62435020, No. 12333012)

作者简介: 王啸臻(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为铟化物红外探测器(E-mail: xiaozhenwang@mail.sim.ac.cn)

通信作者: 陈意桥(1968—), 男, 研究员, 研究方向为分子束外延生长与光电器件(E-mail: yqchen@mail.sim.ac.cn)

structures, yet analytical studies on such optical systems remain relatively scarce. In this study, we conduct a systematic investigation of T2SL-based multilayer stacks using reflectance measurements obtained with a Fourier-transform infrared spectrometer. The experimental findings reveal that the homoepitaxial buffer layer and the substrate do not form an optically abrupt interface, indicating that the buffer layer does not exhibit substantial interference coupling with the T2SL absorber layer. This observation not only supports the reasonable simplification of the buffer layer in optical simulations of T2SL devices but also provides an experimental foundation for analyzing the influence of thin-film interference on material and device performance. Furthermore, by leveraging the thin-film interference phenomenon, we have successfully extracted the average refractive index of $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ T2SL grown on an InAs substrate within the $5000\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ range, yielding an approximate value of 3.7.

Key words: T2SL; fourier-transform spectroscopy; thin-film interference; InGaAs/InGaSb; reflectance spectroscopy

0 引言

得益于可调节的能带结构, T2SL 已成为红外光电器件的核心材料, 在激光制导、光电对抗和夜视探测等领域展现出广泛的应用前景^[1]。其中, 以 InAs/GaSb 为代表的锑化物 T2SL 自提出以来, 因其优异的光电性能受到广泛关注, 成为红外探测器研究的重要内容^[2]。

T2SL 材料通过空间上分离电子与空穴, 有效抑制了俄歇复合过程, 为提升探测器性能提供了有利条件。然而, 这种载流子的空间隔离也导致电子与空穴波函数重叠度降低, 从而显著削弱了材料的光学吸收能力。以 InAs/GaSb 为代表的锑化物 T2SL, 其吸收系数实测值通常集中在 $10^3\text{--}10^4\text{ cm}^{-1}$ 量级^[3]。尽管已有研究通过在 T2SL 中调整 Ga 元素组分, 优化电子与空穴波函数的重叠程度以提升光吸收性能^[4], 但吸收系数的提升幅度有限, 尚未实现数量级上的突破。相比之下, InGaAs 材料在相应波段的吸收系数常可达 10^4 cm^{-1} 以上^[5], 而汞镉碲 (mercury cadmium telluride, MCT) 材料凭借其极高的吸收系数, 即便在长波红外波段也保持优异性能^[6-7]。由于 T2SL 超晶格较低的吸收系数, 光在其构成的多层膜结构中的多次反射与干涉效应更加显著。这种干涉效应可能显著影响材料的有效光吸收, 甚至对器件的光谱响应产生影响。因此, 在 T2SL 器件设计中, 除材料本征吸收性能外, 还需充分考虑光学干涉对器件整体光学行为的影响。

然而, 目前对于锑化物 T2SL 的研究重心主要集中于材料生长、器件工艺及性能分析^[8], 相比之

下, T2SL 的光学性质, 尤其是多层膜间的干涉效应的系统研究, 以及干涉效应在光学参数提取中的潜力尚未得到充分探索。外延材料的光学参数 (如吸收系数、折射率等) 是光电器件设计及优化的关键内容。虽然透射光谱是研究红外波段光学特性的常用便捷方法, 但其干涉信息较弱, 难以有效解析多层膜的干涉特性。为此, 本文采用反射光谱法, 针对 InGaAs/InGaSb T2SL 材料体系开展研究。该方法可有效抑制衬底干扰, 保留更完整的多层膜干涉信息。通过实验与仿真相结合, 我们旨在揭示多层膜结构中干涉效应的主导机制, 阐明各功能层的光学贡献, 并为 T2SL 材料光学行为的研究及光学参数的提取提供实验依据。

1 理论与实验

在薄膜外延中, 复杂的多层膜结构会对光产生不同的调控。即使是最简单的“衬底-缓冲层-外延层”3 层结构, 也可能展现出不同于单一介质的光学特性。我们利用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术生长了“衬底-缓冲层-外延层”3 层膜结构, 以研究这一特殊的光学现象。使用 MBE 技术的优势在于: (1) 超高真空的生长环境保证了材料的纯度, 极大程度上减弱了杂质对材料光学性能的影响; (2) MBE 可保证材料界面的可控性, 良好的界面是研究多层膜光学行为的前提; (3) 材料厚度精准可控, 有利于实验的安排及结果分析。

本文选取 InAs 基 InGaAs/InGaSb 超晶格作为主要研究对象。相较于传统的 InAs/GaSb 体系, 本

文超晶格体系由两种三元化合物构成, 拥有相同的Ⅲ族元素, 其异质界面在化学成分上更为连续, 有效抑制了因Ⅲ族元素互扩散引起的界面模糊与材料劣化^[9]。同时, InGaAs/InGaSb 结构通过应力补偿的方式, 实现了与 InAs 衬底的晶格匹配, 提升了外延质量的稳定性。在材料生长方面, InGaAs/InGaSb 的生长仅需在 As 和 Sb 氛围之间切换, 无需人为引入界面层, 显著简化了 MBE 生长过程中的组分调控与时序控制, 降低了生长难度。因此, 该体系不仅具备更优的结构稳定性, 也为高质量、可重复的外延生长提供了便利。

目前, 基于傅里叶变换红外光谱 (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) 的透射及反射表征是研究薄膜光学性能的常用手段。然而, 透射法在外延膜表征上受到一定限制, 其中主要影响因素之一是衬底。为排除衬底干扰, 目前常采用的手段包括减薄衬底或制备斜劈样品。然而, 这些方法均需引入额外的工艺步骤, 可能破坏样品表面完整性, 甚至因机械应力造成内部损伤, 从而影响材料的光学性质。相比之下, 反射表征在避免对样品破坏的同时也减弱了衬底带来的干扰。

利用 Bruker V80 FTIR 光谱仪对样品进行了透射及反射测试, 样品仓内抽真空, 防止水汽对测试的影响。我们使用了定制的夹具实现了对透射谱和反射谱的同时测量, 内部光路可参考图 1, 其中入射角为 11° 。

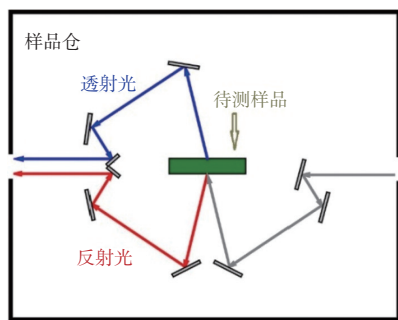


图 1 FTIR 样品仓内透射-反射模块光路示意图

Fig. 1 Optical schematic illustrating the transmittance-reflectance module within the FTIR sample compartment

2 分析与讨论

2.1 基于透射与反射光谱的薄膜干涉现象研究

为研究 InAs 基 InGaAs/InGaSb 超晶格的

学性能, 针对约 $5.2 \mu\text{m}$ (中波) 与 $10.5 \mu\text{m}$ (长波) 两个目标截止波长, 分别制备了样品 TR-MW 与 TR-LW。其超晶格周期分别设计为 4.0 nm 和 7.5 nm 。样品编号中, TR 代表透射与反射 (transmission & reflection) 测试手段, MW 表示中波 (mid-wave, MW), LW 表示长波 (long-wave, LW)。外延片结构及各层厚度如表 1 所示。样品表面覆盖了一层 20 nm 厚的帽层, 其作用是在保护吸收层的同时, 凭借较薄的厚度尽可能减少对材料光学性能的影响。超晶格吸收层厚度为 $2 \mu\text{m}$, 作为光吸收的主要区域, 该厚度足以有效表征材料的光学特性变化。

表 1 外延结构及其各层厚度

Table 1 Epitaxial structure and thickness of each layer

外延层	厚度
Cap InAs	20 nm
Absorber $\text{In}_{0.8}\text{GaAs}/\text{InGa}_{0.8}\text{Sb}$	2000 nm
Buffer InAs	100 nm
Substrate InAs	$500 \pm 25 \mu\text{m}$

为系统评估 TR-MW 和 TR-LW 样品的光学性能, 对其进行了透射谱与反射谱测试, 结果如图 2 所示。为便于对比分析, 图中同时展示了对应衬底的测试结果 (图 2 中虚线)。两样品的光吸收特性存在显著差异: TR-MW 样品在波数大于 2000 cm^{-1} 时表现出明显光吸收; TR-LW 样品则在波数大于 1000 cm^{-1} 时呈现显著光吸收。样品的光吸收特性与截止波长的设计基本吻合。此外, 两样品的光谱中均出现明显的振荡信号, 尤其在反射谱中更为显著。透射光谱在样品的“工作波段”内基本保持平稳, 但 TR-MW 样品在 $800 \sim 1500 \text{ cm}^{-1}$ 的非“工作波段”内表现出明显的振荡。

在所测光谱中观察到周期性振荡结构, 其特征表现为在波数坐标下呈现近似等间距的干涉峰。该特性与法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, FP) 型多光束干涉效应高度吻合, 可归因于光在薄膜上下界面间多次反射所引起的相长干涉。根据薄膜干涉的干涉条件:

$$2n \cdot \frac{d}{\cos \theta} \cdot \nu = m, (m = 1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

式中, n 为薄膜的有效折射率, d 为薄膜的物理厚度, θ 为入射角, ν 为波数 ($\nu = 1/\lambda$), m 为干涉级次的正

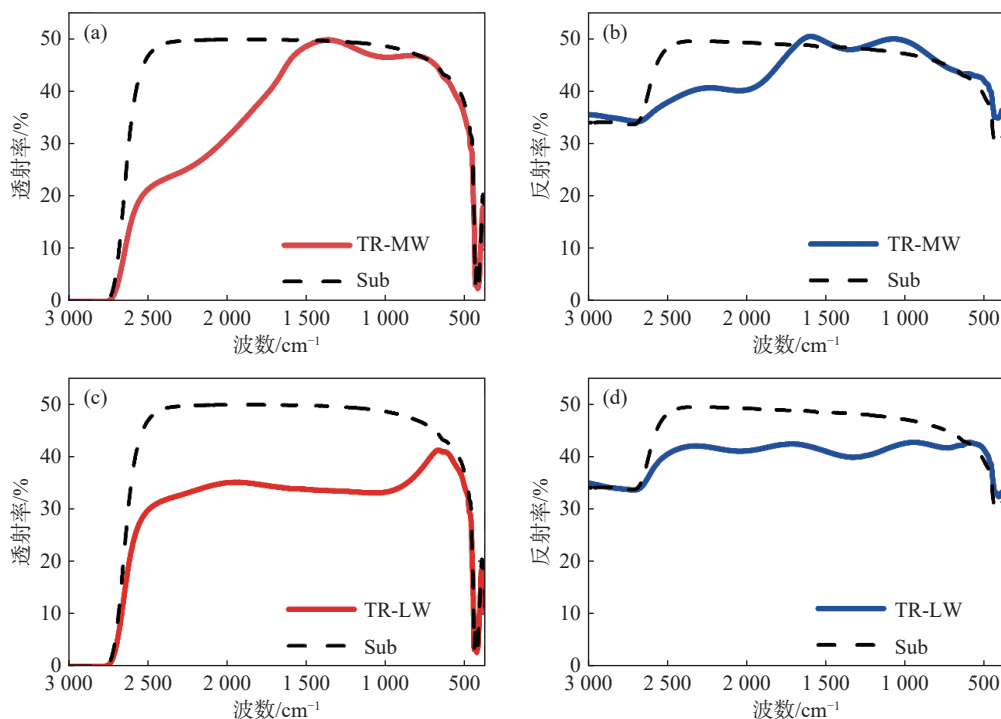


图2 TR-MW样品的(a)透射率和(b)反射率测试结果; TR-LW样品的(c)透射率和(d)反射率测试结果

Fig. 2 (a) Transmittance and (b) reflectance spectra of the TR-MW sample; (c) transmittance and (d) reflectance spectra of the TR-LW sample

整数序号。根据该条件可知,自由光谱范围(free spectral range, FSR),即相邻干涉级次对应的波数差为:

$$\Delta\nu = \frac{\cos\theta}{2nd} \quad (2)$$

其在无色散或弱色散近似下为一恒定值。与实验中观察到的干涉峰在波数轴上近似均匀分布的特征相符,可确认该振荡现象源自薄膜干涉机制。

透射谱与反射谱在干涉振荡特征上呈现显著差异,其关键物理根源在于反射测量对干涉效应具有更高的灵敏度。在反射模式中,首界面的反射光强包含一个与材料吸收无关的恒定分量,该分量能够与后续所有界面的反射光发生稳定的干涉相长或相消。相比之下,透射光强中各分量均受材料本征吸收的调制,导致干涉对比度下降。因此,在材料的“工作波段”内,反射谱通常呈现出清晰的干涉振荡,而透射谱中的振荡信号则极其微弱甚至完全消失。

而对于 TR-MW 样品,在 $800\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ 的非“工作波段”内,无论透射谱还是反射谱均表现出明显振荡。对此我们的解释是:多层膜结构中薄膜干涉主要源于超晶格吸收层的 FP 型多光束干涉效应。

在 TR-MW 样品中的 $800\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ 波数范围,材料的吸收系数极低,光在吸收层的上下界面间的多次反射得以有效维持,形成一个高 Q 值的光学谐振腔。该“FP 腔”结构显著增强了相干叠加效应,从而导致干涉条纹在透射和反射谱中均表现明显。相反,在超晶格吸收层的“工作波段”,由于介质对光的衰减显著,腔内往返传播的光迅速被吸收,多次反射强度急剧下降,导致相干干涉效应被抑制,相应的干涉振荡幅度减弱甚至消失。因此,吸收特性通过调制腔内光场的存留时间与干涉阶次数量,直接影响干涉条纹的可见度。这一现象进一步说明,在多层膜结构中,干涉不仅取决于光程差,还受到外延层材料在特定波段的光学吸收行为影响。

2.2 基于仿真的多层膜干涉特性分析

为深入理解外延膜中薄膜干涉的物理机制,我们采用时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)对样品的反射光谱进行了数值模拟,重点考察缓冲层(buffer layer)的折射率与厚度对其干涉特性的影响。模拟所采用的结构模型如图 3 (a)所示,其中衬底和吸收层均采用 InAs 材料,缓

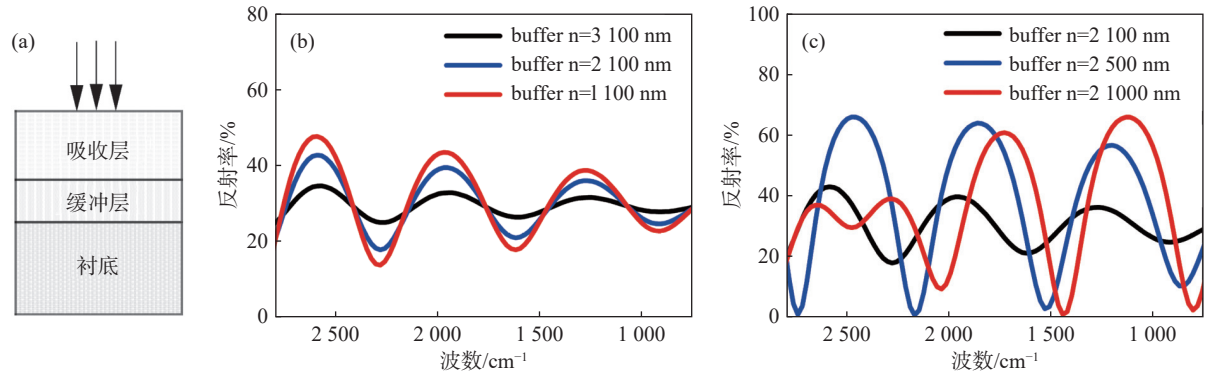


图3 (a) FDTD 仿真结构示意图; (b) 仿真计算所得不同折射率薄层 buffer 对反射谱的影响; (c) 仿真所得 buffer 折射率恒定时, 不同厚度对反射谱的影响

Fig. 3 (a) Schematic representation of the simulated structure in FDTD; (b) simulated reflectance spectra as a function of the refractive index of the buffer layer; (c) simulated reflectance spectra as a function of the buffer layer thickness at a fixed refractive index

冲层为自定义材料,着重考虑折射系数 n 的变化,暂不考虑其吸收效应。仿真计算结果如图 3 (b)、(c) 所示。

图 3 (b) 展示了当缓冲层厚度固定为 100 nm 时,不同折射率条件下仿真计算所得的反射光谱的演变情况。缓冲层选择 100 nm 这一薄层设计,旨在确保缓冲层自身的光学厚度远小于工作波长,从而有效抑制缓冲层内部多次反射引起的附加干涉效应,避免频谱叠加。在此条件下,系统的主要干涉特征主要由缓冲层与吸收层之间的界面反射行为主导,有利于单独分析界面反射系数对薄膜干涉的影响。

如图 3 (b) 所示,在缓冲层厚度极薄的情况下,各曲线的干涉峰位基本重合,表明干涉条件(即 FSR)未受显著影响;然而,干涉条纹的调制深度(即振幅)随缓冲层折射率的变化呈现出明显差异。当缓冲层折射率为 1(接近空气或真空折射率,为理想参考情形,实际材料中难以实现),与吸收层 InAs($n \approx 3.5$)差异最大时,反射谱中干涉振幅最大;随着折射率逐渐增大,振幅单调减小。该现象可归因于缓冲层与吸收层之间折射率对比度的增强:折射率差异越大,界面反射系数越高,导致更多的光被反射回腔内,增强了多光束干涉的相干叠加强度,理论上应提升干涉可见度。

图 3 (c) 展示了当缓冲层折射率为 2 时,不同厚度条件下样品反射光谱的仿真结果。随着缓冲层厚度的增加,缓冲层内部多次反射引起的干涉效应变得不可忽略,导致样品反射谱成为多光束干涉

综合影响的结果,变化规律因此更加复杂。从图 3 (c) 中可以观察到,三条对应不同缓冲层厚度的曲线显示出显著差异:不仅各条曲线的干涉峰位发生了明显偏移,整体包络形状也呈现出不同的特征。这些现象表明,在较厚的缓冲层情况下,薄膜干涉不仅是界面反射系数作用的结果,还受到缓冲层与吸收层共同参与的多光束干涉效应的影响。具体而言,缓冲层厚度的变化改变了光程差,从而调制了干涉条件,使得干涉峰位发生移动;同时,不同厚度下多光束干涉的累积效果也导致了反射谱包络形态的变化。因此,反射谱包络的形态变化可以作为缓冲层参与干涉的有力证明。

2.3 干涉的实验验证与行为机理研究

然而,仿真结果基于理想条件建立,可能忽略实际中的某些细节或引入过多理想化假设。为系统研究缓冲层对多层外延结构中薄膜干涉行为的影响,我们设计并制备了 5 组样品(TR001~TR005),其详细结构参数列于表 2。所有样品均采用 InAs 基材料体系,包含 InAs 帽层、 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ 超晶格长波吸收层(理论周期 7.5 nm)、InAs 缓冲层及 InAs 半绝缘衬底。通过调控缓冲层的掺杂浓度,我们旨在系统调节其与超晶格吸收层之间的界面反射特性,从而验证其对器件内部光学干涉行为的调控作用。此外,结合对缓冲层与超晶格吸收层厚度的协同调整,进一步探究主导薄膜干涉行为的有效光学腔体位置。

图 4 展示了 buffer 在不同掺杂浓度下的反射

表 2 外延样品 TR001~TR005 的超晶格与缓冲层结构参数

Table 2 Superlattice and buffer layer parameters of epitaxial samples TR001-TR005

样品 编号	超晶格 厚度/ μm	缓冲层 厚度/nm	缓冲层掺杂 浓度/ cm^{-3}
TR001	2	100	Undoped
TR002	2	100	-1×10^{18}
TR003	2	100	-5×10^{17}
TR004	1	100	-5×10^{17}
TR005	1	500	-5×10^{17}

谱测试结果。根据掺杂浓度从高到低排序, 3 个样品依次为: TR002、TR003 和 TR001。3 个样品的反射谱中, 自由光谱范围(FSR)大致相等。薄膜干涉引起的振幅变化无明显差异, 但整体光强存在一定区别。这种光强的细微差异可能源于 buffer 掺杂浓度的不同, 导致薄层 buffer 对光的吸收能力发生变化。通常, 对于 n 型 InAs, 掺杂浓度的增加会提高其吸收系数^[10]。而作为掺杂浓度最高的 TR002 样品, 其反射谱强度与其他样品相比呈现出显著差异。

表 3 记录了 TR001、TR002 和 TR003 样品的干涉峰位及其差值。可以看出, 3 个样品的干涉峰

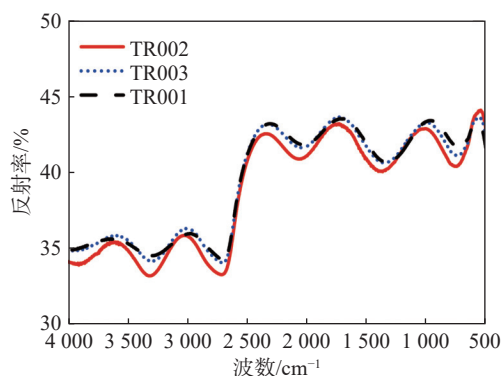


图 4 实验测得的 TR001、TR002、TR003 的反射光谱

Fig. 4 Measured reflectance spectra of samples TR001, TR002, and TR003

位基本一致。若排除因接近衬底“透明波段”边界而产生的异常峰位, 3 组数据计算得到的平均峰位差值均约为 660 cm^{-1} 。根据式(2), 在忽略色散的情况下, 可利用该差值计算该波数范围内的平均折射率, 其表达式为:

$$n = \frac{\cos \theta}{2\Delta v d_{SL}} \quad (3)$$

以 TR003 样品为例, 其 XRD ω - 2θ 曲线如图 5 所示。结合 XRD 测得的超晶格周期为 7.63 nm , 修正后超晶格吸收层的实际厚度约为 $2.037 \mu\text{m}$ 。进一步考虑 11° 的入射角, 可推算出在 $1000 \sim 5600 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 外延层的平均折射率约为 3.71。

表 3 TR001、TR002、TR003 经实验测得的反射谱中的峰位信息

Table 3 Peak positions derived from the experimental reflectance spectra of samples TR001, TR002, and TR003

TR001	峰位/ cm^{-1}	5600.2	5023.6	4382.4	3623.6	2966.0	2303.5	1692.2	960.4
	差值平均值/ cm^{-1}	662.8							
TR002	峰位/ cm^{-1}	5614.7	4996.6	4322.6	3603.3	3020.0	2341.1	1726.9	1012.4
	差值平均值/ cm^{-1}	657.5							
TR003	峰位/ cm^{-1}	5593.5	5005.3	4389.1	3592.7	2998.7	2324.7	1726.0	994.1
	差值平均值/ cm^{-1}	657.0							

图 6 对比了 TR003、TR004 与 TR005 三个样品的反射光谱。其中, TR003 与 TR004 具有相同的缓冲层厚度 (100 nm), 但 TR004 的超晶格吸收层厚度从 $2 \mu\text{m}$ 减小至 $1 \mu\text{m}$; TR005 则在 TR004 结构基础上将缓冲层厚度增加至 500 nm 。结果表明, TR004 与 TR005 的 FSR 基本一致, 而两者均与 TR003 存在显著差异。该现象可归因于吸收层厚

度的减小直接改变了干涉腔的光学长度, 进一步表明超晶格吸收层是薄膜干涉行为的主要贡献者。

如表 4 所示, TR004 与 TR005 样品的干涉峰位及其差值表明, 在吸收层厚度减半后, 两者的平均峰位差值约为 TR003 样品对应值的两倍, 符合式(2)所描述的干涉规律。基于式(3)进一步计算得出, 外延层材料在 $4700 \sim 700 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内的平均折

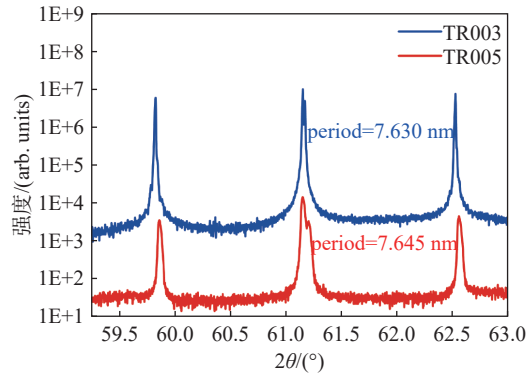


图5 TR003 和 TR005 样品 XRD 的 ω - 2θ 扫描曲线
Fig. 5 XRD ω - 2θ scans of samples TR003 and TR005

射率约为 3.69, 与 TR003 样品的计算值极为接近。

在 500 cm^{-1} 附近, 所有样品均观察到干涉振幅发生突变或出现异常衰减。分析认为, 该现象与 InAs 衬底在此波段的吸收特性变化密切相关。随着 InAs 衬底吸收系数显著上升, 由吸收层构成的干涉腔内光场衰减加剧, 多次反射过程受到强烈抑

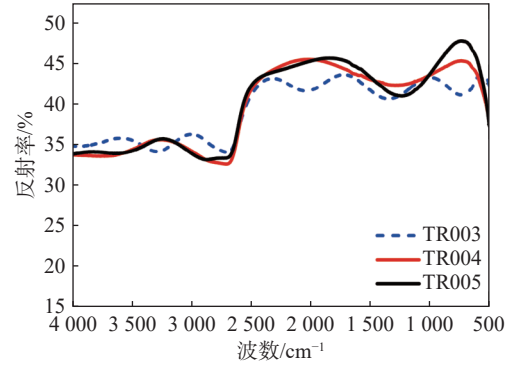


图6 实验测得的 TR003、TR004、TR005 的反射光谱
Fig. 6 Measured reflectance spectra of samples TR003, TR004, and TR005

制, 导致原有干涉条件发生改变。此时, 薄膜干涉行为不再仅由吸收层单独主导, 衬底与缓冲层的共同作用开始显现。这一机制也能够解释图 4 中两个关键现象: (1) 500 cm^{-1} 附近的干涉峰位差显著偏离其他波段; (2) 相应光谱曲线的振幅相对关系发生变化。

表 4 TR004、TR005 经实验测得的反射谱中的峰位信息

Table 4 Peak positions derived from the experimental reflectance spectra of samples TR004 and TR005

TR004	峰位/ cm^{-1}	4693.8	3253.3	1845.5	725.1
	差值平均值/ cm^{-1}	1322.9			
TR005	峰位/ cm^{-1}	4684.2	3249.4	2084.6	736.7
	差值平均值/ cm^{-1}	1315.8			

根据实验结果, 发现在“衬底-缓冲层-外延层”这样的多层膜结构中, 薄膜干涉效应主要由吸收层主导, 而缓冲层几乎不参与其中。这一现象可归因于衬底与缓冲层之间缺乏一个清晰的光学界面, 难以对入射光产生有效反射。由于缓冲层通常通过同质外延方式生长, 其晶体结构和光学性质与衬底高度相似, 即使在高掺杂条件下也难以形成可分辨的“光学界面”。因此, 缓冲层无法构成一个有效的光学干涉“腔”, 在整体光学响应中作用微弱。

上述机制也解释了实验结果与 FDTD 仿真之间的差异。在仿真建模过程中, 为探究折射率变化对干涉行为的影响, 常将缓冲层设定为独立的光学材料并赋予自定义参数。然而, 这种处理方式忽略了实际同质外延体系中缓冲层与衬底的同质连续性, 未能准确反映真实界面对光的调制行为, 从而

导致仿真结果与实验观测之间出现系统性偏差。

在确定了薄膜干涉现象的发生及其发生位置后, 我们还需要考虑多层膜结构中的薄膜干涉可能会造成的影响。典型地, 材料吸收系数的计算可能会由于薄膜干涉的存在而产生“假信号”^[3]。利用 KMM (Kubelka-Munk Method)^[11] 计算 TR-MW 和 TR-LW 样品的吸收系数, 如图 7 所示, 其中 TR-MW 样品的吸收系数在 1100 cm^{-1} 附近出现明显突起, 这便是由薄膜干涉而造成的“假信号”。对于 TR-LW 样品, 由于其工作波段更长, 吸收曲线在 1100 cm^{-1} 处存在明显突起, 这明显是受到了干涉产生的影响。除此之外, 薄膜干涉会显著调制器件的光谱响应, 相关研究表明^[12-13], 该效应可使器件的量子效率曲线在特定波长处因干涉相长或相消而产生显著的振荡峰; 通过优化设计主动利用这一

效应,可构建光捕获结构,有效延长光程,从而在材料本征吸收较低的情况下实现器件的高量子效率。

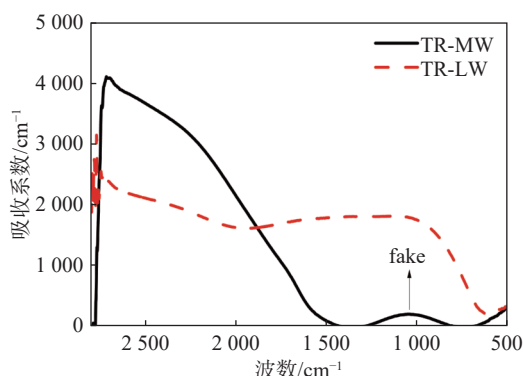


图7 利用KMM方法计算所得的TR-MW及TR-LW样品的吸收系数

Fig. 7 Absorption coefficients of the TR-MW and TR-LW samples, calculated using the KMM method

3 结论

本研究基于反射光谱技术,系统分析了InGaAs/InGaSb T2SL多层外延结构中的薄膜干涉行为。实验结果表明,干涉效应主要由作为吸收层的T2SL结构主导,而同质外延生长的缓冲层由于与衬底之间缺乏显著的光学界面,几乎不参与干涉过程。这一发现揭示了在T2SL器件光学建模中合理简化缓冲层处理的可行性。进一步地,通过干涉条纹的周期性,反演出 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ 超晶格在外延方向上的平均折射率在 $5000\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 波段约为3.7。值得注意的是,若忽略外延层中的干涉效应,可能在吸收系数的提取中引入显著误差。本研究不仅为T2SL材料的光学参数提取提供了实验依据,还深入探讨了T2SL红外探测器材料内部的光学行为。

参考文献:

[1] Rogalski A, Martyniuk P. InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 48(1): 39-52.

[2] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: future prospect[J]. *Applied Physics Reviews*, 2017, 4(3): 031304.

[3] Katayama H, Takekawa T, Kimata M, et al. Measurement of absorption and external quantum efficiency of an InAs/GaSb type II superlattice[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70: 53-57.

[4] Ariyawansa G, Reynier C J, Steenberg E H, et al. InGaAs/InAsSb strained layer superlattices for mid-wave infrared detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(2): 022106.

[5] Zhou L, Zhang Y G, Gu Y, et al. Absorption coefficients of $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ at room temperature and 77 K[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 576: 336-340.

[6] Rogalski A. Quantum well photoconductors in infrared detector technology[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(8): 4355-4391.

[7] 褚君浩. 窄禁带半导体的光电跃迁效应[J]. *激光与红外*, 2006, 36(S1): 759-765.

Chu Junhao. Effect of photo-electric transition in narrow gap semiconductors[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(S1): 759-765.

[8] Liu S D, Fang D, Fang X, et al. Advances in epitaxial growth, structural and optical properties of antimonide-based type-II superlattices[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(2): 165-186.

[9] Baird R J, Potter T J, Kothiyal G P, et al. Indium diffusion in the chemical potential gradient at an $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ interface[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(24): 2055-2057.

[10] Bhat R, Dutta P S, Guha S. Crystal growth and below-bandgap optical absorption studies in InAs for non-linear optic applications[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, 310(7-9): 1910-1916.

[11] Ariyawansa G, Steenberg E, Bissell L J, et al. Absorption characteristics of mid-wave infrared type-II superlattices[C]//Proceedings of SPIE Defense + Security. Bellingham, WA: SPIE, 2014: 90701J.

[12] Huang M, Chen J, Zhou Y, et al. Light-harvesting for high quantum efficiency in InAs-based InAs/GaAsSb type-II superlattices long wavelength infrared photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(14): 141102.

[13] Xu Z, Chen J, Wang F, et al. High performance InAs/GaAsSb superlattice long wavelength infrared photo-detectors grown on InAs substrates[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(5): 055011.