文章编号：1672-8785(2019)02-0014-05

InAs/GaSb 应变超晶格红外调制光谱研究

申 晨 折伟林 李 乾 邢伟荣 晋舜国 刘 铭
（华北光电技术研究所，北京 100015）

摘 要：在用步进扫描傅里叶变换红外(Fourier Transform Infrared，FTIR)调制光致发光(Photoluminescence，PL)光谱仪进行测试时，基于 FTIR 的优势，并结合 PL 无损、灵敏度高、简单的优点，通过减弱背景干扰来提高信号强度。研究了背景噪声、杂质能级和温度对 InAs/GaSb 应变超晶格材料的发射峰强度及位置的影响，并通过改变测试参数，总结出了针对不同材料的测试方法。这项研究结果对 InAs/GaSb 应变超晶格材料的外延生长及后续加工具有参考价值。

关键词：InAs/GaSb 应变超晶格材料；光致发光光谱；截止波长；分子束外延

中图分类号：TM23 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2019.02.003

Research on Infrared Modulation Photoluminescence Spectroscopy for InAs/GaSb Superlattice

SHEN Chen，SHE Wei-lin，LI Qian，XING Wei-rong，JIN Shun-guo，LIU Ming
（*North China Research Institute of Electro-optics，Beijing 100015，China*）

Abstract：When the step scanning Fourier Transform Infrared (FTIR) modulation Photoluminescence Spectroscopy (PL) is used for measurement，the background disturbance is eliminated by combining the superiority of FTIR with the advantages such as non-destruction，high sensitivity and convenient of PL，so as to enhance signal intensity. The influences of background noise，impurity level and temperature on the emission intensity and location in InAs/GaSb strain superlattice material are studied. By changing the measurement parameters，different measurement methods are summarized. The research results are of referential value to the epitaxy of InAs/GaSb strain superlattice materials and the subsequent processing of them.

Key words：InAs/GaSb superlattice；photoluminescence spectrum；cut-off wavelength；molecular beam epitaxy

0 引言

超晶格结构是指由两种不同材料交错生长组成的超薄层在生长方向上的一维周期结构。它是一种薄层厚度的周期在电子的平均自由程内的人造材料。当超晶格的厚度在一定范围内时，由于两种材料晶格失配，只产生弹性应变而无缺陷，所以这种结构的超晶格称为应变超晶格[1]。作为一种新型红外半导体材料，InAs/GaSb应变超晶格可通过分子束外延(Molecular Beam Epitaxy，MBE)或金属有机化合物

收稿日期：2019-01-02

作者简介：申晨(1993-)，女，河北唐山人，硕士，主要从事红外半导体材料的测试评价及分析工作。
E-mail：shenchen725@qq.com

化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD)等方法生长在 GaSb 或 InAs 衬底上。它的优势在于用其制成的红外探测器可以在较高温度下工作并具有更低的暗电流。该材料的禁带宽度可通过改变 InAs、GaSb 交错层的厚度来调节，因此它具有较宽的探测范围，即可探测 3～30 μm 波段的红外信号。另外，在材料生长和器件制备方面，针对 III-V 族系统的材料技术较为成熟，且材料均匀性较好，使得 InAs/GaSb 应变超晶格可以与 HgCdTe、InSb 等传统红外半导体材料相竞争[2]。

本文主要对用 MBE 方法在 GaSb 衬底上生长的 InAs/GaSb 应变超晶格材料进行研究，测量该材料在不同温度与测试参数条件下的截止波长。利用截止波长可以推算出 InAs/GaSb 应变超晶格材料的禁带宽度，由此判断该材料是否符合后续的器件制造条件，进而调整分子束外延工艺。对于传统 HgCdTe 材料的截止波长测量，我们一般采用 FTIR 光谱仪[3]。但由于 InAs/GaSb 应变超晶格材料 GaSb 衬底的红外透光性较差，我们无法通过用 FTIR 方法测量透过系数来得到截止波长。而 PL 光谱仪由于分束器的原因仅在可见光-近红外波段应用广泛，但 II 类超晶格材料的截止波长大多在中波红外或长波红外波段，因此用 PL 光谱仪测量 II 类超晶格材料时会受到相应限制。为了填补 II 类超晶格材料截止波长测试的空白，我们采用了一种结合 FTIR 光谱仪的红外调制 PL 方法。该方法主要基于 FTIR 光谱仪中的迈克尔逊干涉仪系统和光致发光光谱仪，应用步进扫描模式，并结合 FTIR 光谱仪在高信噪比和良好分辨能力上的优势，解决了 GaSb 衬底透光性差的问题，最终实现了 0.5～20 μm的测量范围[4]。真空环境的应用减小了背景噪音对测试结果的影响。该研究对调整应变超晶格材料的外延工艺及后续生产具有重大意义。

1 FTIR-PL 系统的工作原理

FTIR-PL 系统主要由傅里叶红外光谱仪、激光光源、锁相放大器、斩波器和光束引导部件构成。作为冷发光的一种，光致发光是指半导体材料吸收光子(或电磁波)后激发电子跃迁至高能态，然后通过电子从高能态到低能态的跃迁重新辐射出光子(或电磁波)的过程。激光入射至样品后产生 PL 信号。该信号经锁相放大器过滤后作为外部光源进入 FTIR 光谱仪，接着用作待测光源。入射到 FTIR 光谱仪的发光信号经过多次反射后进入迈克尔逊干涉仪的分束器，被其分成两束等幅光束。其中一束透射到动镜上，另一束反射到定镜上。通过动镜的匀速移动，两束光之间形成一定的相位差并最终汇聚在一起而发生干涉现象。检测器记录干涉信号并经过傅里叶变换获得最终结果。图 1 为 FTIR-PL 测试系统的内部构造图。

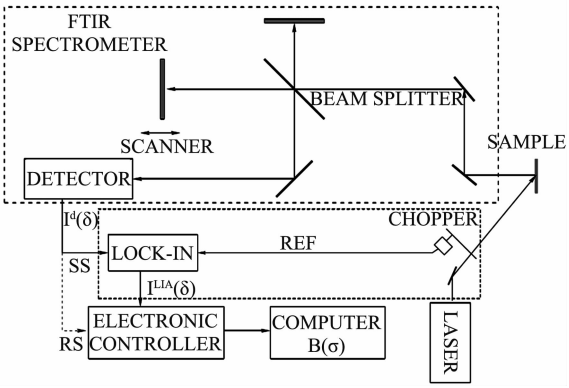


图 1 基于 FTIR 光谱仪的红外 PL 系统的内部构造图与光路图[5]

FTIR 光谱仪通常具有以下两种工作模式：(1)连续扫描，即动镜作连续的匀速运动；(2)步进扫描，即动镜间歇性地向前移动(前进一步，停留一段时间，再前进下一步)。本次实验采用步进扫描模式，因为在此模式下探测器可利用动镜停止的间隙完成对干涉数据的采集和信号处理，从而提高光谱信号的分辨率和信噪比。

2 实验结果及分析

温度、表面平整度、层周期厚度等物理特

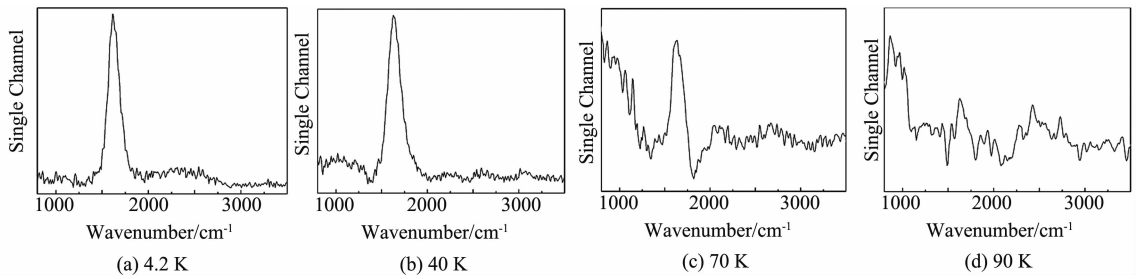


图 2 InAs/GaSb 应变超晶格材料分别在(a) 4.2 K、(b) 40 K、(c) 70 K、(d) 90 K 温度下得到的 FTIR-PL 光谱

性对 InAs/GaSb 应变超晶格材料的光学特性和电子能带结构有着重要影响[6-7]。利用红外调制光谱的优势及其与光电器件的直接相关性，可以对 InAs/GaSb 超晶格的能带结构、带隙跃迁和界面特性进行研究，有助于解释一些物理现象，进而优化材料生长并为器件设计提供支持。

2.1 测试温度对光谱的影响

本文在不同温度下对 InAs/GaSb 应变超晶格材料进行了 FTIR-PL 测试(结果见图 2)。

从图 2 中可以看出，在波数为 1602 cm^{-1}即波长为 6.24 μm 的位置上有一个尖锐的、强度很强的发射峰。当 T=4.2 K 时，信号信噪比较好，且在小波数(长波)范围内没有明显信号。随着温度上升，长波范围内的杂峰信号趋于明显。这是因为一些气体分子(如水蒸气、CO_2)的 PL 信号都在长波波段，而且随着温度的升高，材料的发射峰信号减弱，于是杂峰信号就逐渐显现出来。另外，随着温度的升高，样品的发射峰信号强度减弱。为了更直观地体现不同温度下的样品发射峰信号强度，图 3 给出了各个温度下 InAs/GaSb 应变超晶格材料的 FTIR-PL 光谱。

如图 3 所示，随着温度的升高，信噪比和信号强度都大幅下降。T=40 K 时的信号强度仅有 10 K 时的一半。当温度升至 70 K 以上时，信号强度低且峰宽，无明显发射峰。随着温度上升，截止波长向短波方向移动，由10 K 时的 6.26 μm 蓝移至 6.00 μm。在此温度范围内，PL 主要的发光是由通过第一电子微带与

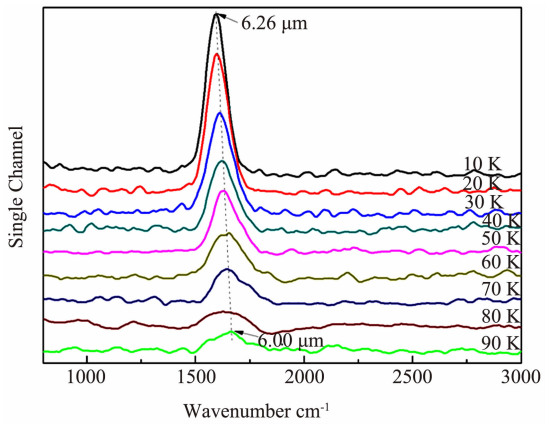


图 3 InAs/GaSb 应变超晶格材料在不同温度下的 FTIR-PL 光谱(为更直观地比较，对样品的数据点进行了平移)

第一重空穴微带之间的带隙光学跃迁辐射出的光子形成的[8]。

2.2 设备参数对光谱的影响

实验过程中，测试参数的选择会极大地影响光谱强度和信噪比。对于 FTIR-PL 测试，可供选择改变的测试参数包括扫描分辨率、扫描时间、扫描速度、锁相放大器灵敏度、光阑直径、相位分辨等。本文主要研究扫描分辨率、光阑直径和锁相放大器灵敏度对光谱的影响。

2.2.1 扫描分辨率对光谱的影响

如图 4 所示，分别测试了 InAs/GaSb 应变超晶格材料在扫描分辨率为 64 cm^{-1}、32 cm^{-1}、16 cm^{-1}、8 cm^{-1}、4 cm^{-1}和 2 cm^{-1}时的 FTIR-PL 光谱。可以看出，随着分辨率的降低，发射峰信号强度和信噪比减小。这是由于分辨率降低，采集到的数据点减少，导致信

号减弱。当扫描分辨率为 64 cm^{-1}时，没有材料发射峰信号。当扫描分辨率大于 16 cm^{-1}时，发射峰信号都比较明显且信噪比良好。但是，由于分辨率大小与测试时间成正相关，测试中应根据信号强度和信噪比合理选择扫描分辨率。对于 InAs/GaSb 应变超晶格材料，可选用 8 cm^{-1}或 16 cm^{-1}分辨率进行测试。

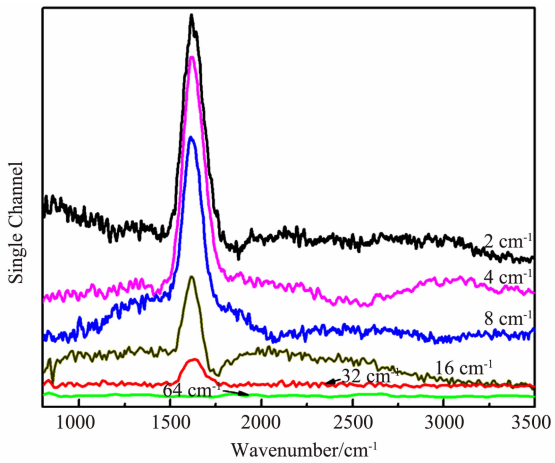


图 4 InAs/GaSb 应变超晶格材料在不同扫描分辨率下的 FTIR-PL 光谱(T=4.2 K)。为更直观地比较，对样品的数据点进行了平移

2.2.2　光阑直径对光谱的影响

图 5 所示为不同光阑直径下的测量结果。当光阑直径为 0.5 mm 时，没有明显的发射峰信号；当光阑直径小于 3 mm 时，信号信噪比较低；当光阑直径小于 5 mm 时，随着光阑直径的增加，材料受激面积增大，所以发射峰信号强度增加；当光阑直径大于 5 mm 时，达到最大接收范围，此时信号强度变化不明显且信噪比较高。因此，测试时可选择直径为 5 mm 或 6 mm 的光阑。

2.2.3　锁相放大器的灵敏度对光谱的影响

如图 6 所示，当锁相放大器的灵敏度为 500 μV 时，背景信号没有被滤除，检测到较多峰，且材料的发射峰不明显。当灵敏度为 1 mV时，在波数 1602 cm^{-1}和 1721 cm^{-1}处检测到两个峰。但随着灵敏度的降低，波数 1721 cm^{-1}处的峰消失。由此推测，波数 1721 cm^{-1}处的峰是个杂峰。当灵敏度为500 mV

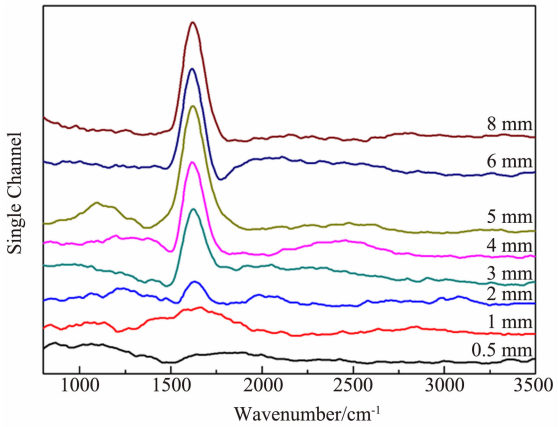


图 5 InAs/GaSb 应变超晶格材料在不同光阑直径下测得的 FTIR-PL 光谱(T=4.2 K)。为更直观地比较，对样品的数据点进行了平移

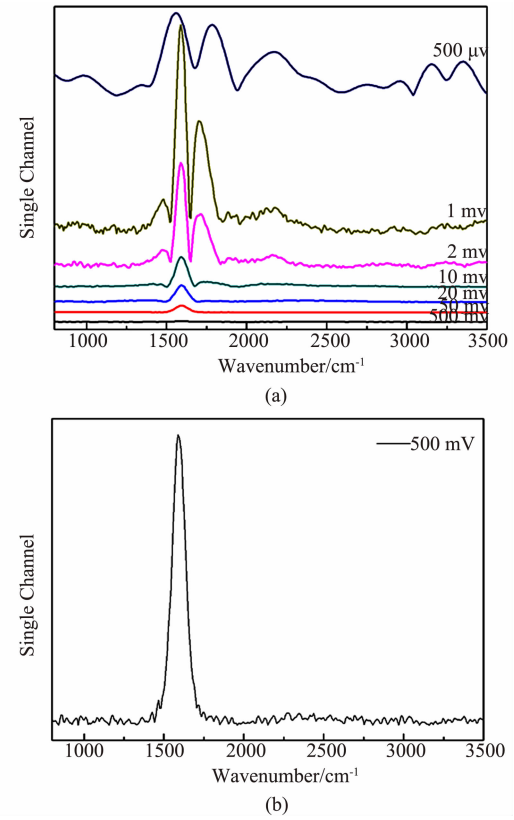


图 6 (a)InAs/GaSb 应变超晶格材料在不同锁相放大器灵敏度下测得的 FTIR-PL 光谱(为更直观地比较，对样品的数据点进行了平移)；(b)锁相放大器的灵敏度为 500 mV 时的放大图(T =4.2 K)

时，得到了信噪比较高的光谱结果。

同时，随着灵敏度的降低，材料发射峰的信号强度大幅下降，但信噪比增大。根据实际情况，并综合考虑测试结果的强度和信噪比，

在测试 InAs/GaSb 应变超晶格材料时可将锁相放大器的灵敏度选为 10 mV 或 20 mV。

3 结束语

本文采用 FTIR-PL 光谱仪测量了 InAs/GaSb 应变超晶格材料，并得出了以下结论：(1)温度越低，材料的 PL 光谱强度越强，信噪比越高。当温度升至 70 K 以上时，信号强度与杂峰强度相当，没有明显的发射峰。(2)随着分辨率的降低，发射峰的信号强度和信噪比减小。可根据时间和材料，选择 8 cm^{-1} 或 16 cm^{-1} 的扫描分辨率进行测试。(3)当光阑直径达到 5 mm 时，达到最大接受范围，此后信号不会随光阑直径的增加而增强。测试时，可选择直径为 5 mm 或 6 mm 的光阑。(4)随着灵敏度的降低，材料发射峰的信号强度下降，但信噪比增大，杂峰得以排除。测试时，可将锁相放大器的灵敏度选为 10 mV 或 20 mV。

参考文献

[1] Osbourn G C. Strained - layer Superlattices from Lattice Mismatched Materials [J]. *Appl phys*, 1982, **53**(3): 1580.

[2] 徐志成. InAs/GaSb II 类超晶格探测器结构 MBE 生长研究 [D]. 上海：中国科学院上海技术物理研究所，2014.

[3] 折伟林，田璐，晋舜国，等. $Hg_{1-x}Cd_xTe$/CdTe/Si 薄膜厚度测试方法的研究 [J]. **激光与红外**，2012，**42**(12)：1351-1354.

[4] 陈熙仁. 红外调制光谱研究 III-V 族窄禁带锑化物与稀铋半导体电子能带结构 [D]. 上海：中国科学院上海技术物理研究所，2015.

[5] Shao J，Lu W，Lu X，et al. Modulated Photoluminescence Spectroscopy with a Step-scan Fourier Transform Infrared Spectrometer [J]. *Rev Sci Instrum*，2006，**77**(6)：063104.

[6] Zhang Y H，Ma W Q，Cao Y L，et al. Long Wavelength Infrared InAs/GaSb Superlattice Photodetectors with InSb-like and Mixed Interfaces [J]. *Quantum Electron*，2011，**47**(12)：1475.

[7] Wei Y J，Manijeh Razeghi. Modeling of Type-II InAs/GaSb Superlattices Using an Empirical Tight-binding Method and Interface Engineering [J]. *Phys Rev B*，2004，**69**(8)：085316.

[8] Wang L W，Wei S H，Mattila T，et al. Multiband Coupling and Electronic Structure of (InAs)n/(GaSb)n Superlattices [J]. *Phys Rev B*，1999，**60**(8)：5590.