

文章编号: 1000-7032(2024)05-0817-07

界面特性对 InAs/GaSb II 型超晶格光学性质影响理论研究

马泽军^{1,2}, 李 远^{1,2*}, 朱申波^{1,2}, 程凤敏^{1,2}, 刘俊岐^{1,2}, 王利军^{1,2},
翟慎强^{1,2}, 卓 宁^{1,2}, 陈涌海^{1,2}, 张锦川^{1,2}, 刘舒曼^{1,2}, 刘峰奇^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: InAs/GaSb II 型超晶格是中红外波段光电子器件的核心结构, 其 II 型能带排列特点使电子、空穴在实空间分离而跨过界面, 其非公共原子构型使得界面态丰富。我们在 Burt-Foreman 包络函数理论的基础上, 讨论了不同界面态对超晶格电子能态和波函数的调控作用。理论计算表明, 超晶格缓变界面和界面势两种不对称界面态分布, 都会导致重空穴带的自旋劈裂, 而只有施加界面势时才会使得轻空穴带发生自旋劈裂。此外, 研究了改变阱宽和改变势垒时超晶格体系带隙的变化趋势。结果表明, 随着势垒厚度增大, 陡峭界面和缓变界面两种界面态下的带隙计算结果逐渐降低, 并且随着厚度增加带隙趋于收敛, 而界面势下的带隙计算结果随着势垒厚度的增大而增大, 与前者呈现相反的趋势, 这为中红外超晶格器件的精确设计提供了可参考的理论基础。

关键词: 砷化物; 超晶格; 界面态; 前后向差分法

中图分类号: O471.5

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240054

Theoretical Study on Effect of Interfacial Properties on Optical Properties of InAs/GaSb Type II Superlattices

MA Zejun^{1,2}, LI Yuan^{1,2*}, ZHU Shenbo^{1,2}, CHENG Fengmin^{1,2}, LIU Junqi^{1,2}, WANG Lijun^{1,2},
ZHAI Shenqiang^{1,2}, ZHUO Ning^{1,2}, CHEN Yonghai^{1,2}, ZHANG Jinchuan^{1,2},
LIU Shuman^{1,2}, LIU Fengqi^{1,2}

(1. Laboratory of Solid-State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: yuanli@semi.ac.cn

Abstract: The InAs/GaSb type-II superlattice (SL) constitutes the fundamental structure for mid-infrared optoelectronic devices, characterized by its type-II band alignment that facilitates the spatial separation of electrons and holes across the interface, and a unique atomic configuration leading to a rich variety of interface states. Building upon the Burt-Foreman envelope function theory, we investigate the influence of different interface states on the electronic states and wave functions of the superlattice. Theoretical calculations indicate that both asymmetric distributions of interface states, namely gradual interface variation and interface potential, result in spin splitting of the heavy-hole band, while spin splitting in the light-hole band occurs only with the application of an interface potential. Additionally, we examine the trends in the band gap of the superlattice system when altering well width and barrier height. The results show that as the barrier thickness increases, the gap calculations under both abrupt and gradual interface states gradually decrease, converging with increasing thickness. In contrast, the gap calculated with interface potential treatment increases with the thickness of the barrier, exhibiting an opposite trend to the former two.

收稿日期: 2024-03-02; 修订日期: 2024-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(12393832, 62327813, 62235019, 62235016, 61991431)

Supported by National Natural Science Foundation of China(12393832, 62327813, 62235019, 62235016, 61991431)

This provides a theoretical foundation for the precise design of mid-infrared superlattice devices.

Key words: antimonide; superlattice; interface state; forward and backward difference method

1 引 言

由于 InAs/GaSb 超晶格 (SL) 中的 II 型能带排列, 电子和空穴态分别被限制在 InAs 和 GaSb 层内, 并且在空间上分离。这与具有 I 型能带排列的传统 SL (例如 GaAs/AlGaAs SL) 形成了鲜明对比 (其中电子和空穴被限制在同一材料层中)^[1]。在未掺杂的 InAs/GaSb SL 中主要有两种光学跃迁, 一种是将 GaSb 层中被占据的价带中的电子激发到 InAs 层中未被占据的导带中, 这种带间光学跃迁是通过 InAs/GaSb 界面上电子和空穴波函数的重叠实现的^[2]。另一个过程是在同一材料层中将电子从占据的导带或价带激发到未占据的导带或价带, 这种带内光学跃迁与传统 SL 中发生的情况类似。这些带间和带内过渡通道也可以通过调整 InAs 或 GaSb 层宽度来调谐。由于这些独特的特性, InAs/GaSb II 型 SL 已被选为中红外检测器件的候选材料^[3-4]。令人们感兴趣的是, 短周期 InAs/GaSb II 型 SL 可用作在 3~5 μm 波长范围内工作的非制冷的中红外探测器^[5]。

InAs/GaSb II 型 SL 系统已使用多种理论方法进行建模, 例如紧束缚法^[6]、赝势法^[7]和 $k\cdot p$ 法^[8]。在这些方法中, $k\cdot p$ 方法因其更容易的代码实现和非常好的数值精度而得到了最广泛使用。 $k\cdot p$ 方法是描述半导体能带结构的有效工具。到目前为止, 它是模拟半导体异质结构和器件 (如量子阱、超晶格、红外探测器和半导体激光器) 较为普遍的方法^[9]。

在半导体材料中, 存在着分布广泛的能级状态, 但并非所有能级状态均为研究对象所关注的。在光电性能研究中, 我们主要关注与直接带隙跃迁相关的能级状态。这些能级状态分布在动量空间中满足跃迁动量匹配条件的状态, 即动量空间中的波矢 k 位于特定的点^[10]。同时, 考虑到载流子倾向于占据能量较低的区域, 与载流子相关的光电效应主要发生在动量空间中能量的极值点附近^[11-12]。这些极值点在动量空间中也位于同一点。全面解析半导体材料中的所有能带是一项复杂而耗时的任务。然而, 为了研究我们关注的光电性能, 我们可以采用近似的方法来获取动量

空间极值点附近的能级状态分布情况。由 Bard-
een 和 Seitz 提出的 $k\cdot p$ 方法是基于这一思想发展而来的。该方法通过在某一波矢点 k 的附近引入微小扰动, 从而实现对局部极值点的寻找。 $k\cdot p$ 方法的基本理论为 $k\cdot p$ 微扰理论, 即一种引入微扰项的能带计算数值方法, 可用于确定能隙能量和跃迁强度^[13]。在 $k\cdot p$ 方法中, 通过外推布里渊区的中心能隙能量和动量矩阵元, 可以得到整体能带结构, 这种方法可获得能带色散关系和有效电子质量的解析表达式。低维半导体 $k\cdot p$ 方法具体的数值求解法有传输矩阵法、傅里叶变换有限波矢法与前后向有限差分法, 其中前后向有限差分法是目前采用较为广泛且算法简单高效的数值计算方法^[13-16]。在之前的工作中, 我们详细讨论了前后向有限差分算法下的数值稳定性问题。

在理想情况下, 量子阱或超晶格在界面处是陡峭变化的, 但在实际材料生长过程中, 无法达到理想的完全陡峭型界面。所以在进行理论计算时, 需要考虑界面缓变造成的影响。对于 III-V 族半导体低维异质结构, 缓变层厚度一般在 2 nm 以内。除界面缓变以外, 还需要考虑界面引起的微观非对称性 (MIA) 如何改变系统的能态。针对我们研究的 InAs/GaSb SL 系统, 其主体材料 InAs 和 GaSb 在界面处没有共同原子 (NCA), 因此在该体系中可以形成类 InSb 型或类 GaAs 型界面^[17]。理论研究表明, 对于 NCA 型异质结构, 界面 MIA 会导致较为显著的界面势能, 该界面势能具有短程性质^[18-20]。2010 年, Li 等建立了包含 MIA 效应的八带 $k\cdot p$ 模型来计算 [001] 方向上短周期 InAs/GaSb 超晶格的光学各向异性^[21]。2015 年, Dong 等利用 MIA 效应研究了 InAs/GaSb 超晶格的光学性质, 包括跃迁矩阵元与光学增益的计算^[22]。2019 年, Delmas 用软件进行 InAs/GaSb 超晶格红外探测器模拟, 结果表明, 忽略 MIA 效应通常会导致 SL 带隙的高估^[23]。2020 年, Zhao 等在实验上研究了器件级别的界面问题, 报道了微观界面对半导体能带偏移的影响^[24]。目前, 仍然缺乏对锑化物超晶格中各种界面状态的综合性对比研究。

本文针对 InAs/GaSb II 型超晶格结构, 利用前后向有限差分算法进行数值计算, 在理论上研

究了陡峭界面、界面缓变以及短程界面势能对体系能态和波函数的影响,为后续铋化物光电子器件的理论设计与优化奠定了基础。

2 理论模型

当考虑MIA效应时,总哈密顿量可写为 $H =$

$$\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}i & 0 & 0 & \frac{\sqrt{6}}{3}i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3}i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3}i & 0 & 0 & \frac{\sqrt{6}}{3}i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{6}}{3}i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{6}}{3}i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

应变八带哈密顿量以及有限差分的处理方法与形式详见补充文件。

3 结果与讨论

我们考虑具有II型能带排列的InAs/GaSb SL,如图1所示。 z 轴沿着[001]生长方向, x 轴和 y 轴分别沿着[100]和[010]方向。假设InAs势阱层宽度为 L_1 ,GaSb势垒层宽度为 L_2 ,则这种SL结构的周期性由 $d=L_1+L_2$ 决定。由于InAs/GaSb SL是NCA异质结构,该类SL中存在两种不同的理想界面,即类InSb和类GaAs界面。比较这两种类型界面的早期工作发现,类InSb界面可以实现更小的带隙能量和更高的光吸收^[25],并且SL上的类InSb界面相比于类GaAs界面是更光滑组成层^[26]。最近,研究表明类InSb界面可以平衡大多数短周期结构中的应变^[27],这有利于SL的生长。基于上述考虑,类InSb界面更适合InAs/GaSb NCA SL的生长及其作为光电探测器应用。尽管该类SL中的实际界面可以相互扩散,但在目前的工作中,我们假设此处研究的所有InAs/GaSb II型SL都具有类InSb界面,所以我们仅在类InSb界面上采取不同的界面态以方便比较。

我们首先计算了三种界面态下波函数的分布,如图1所示,其中 $L_1=L_2=2.0$ nm。SL的具体结

构为:GaSb 5.0 nm/InAs L_1 /GaSb L_2 /InAs L_1 /GaSb 5.0 nm。可以看出,三种界面态下的导带基态波函数分布区别不大。当界面采用缓变模型时(缓变层厚为0.4 nm),价带基态波函数分布会发生轻微改变;当在界面上施加界面势时(界面势强度为0.7 eV^[28]),价带基态波函数分布变化比较显著,波函数向施加界面势的界面靠拢并且形状更加尖锐。

$$H_1 = \theta a_0 H_i \delta(z - z_0), \quad (1)$$

其中, H_i 为类InSb界面的拟合参数, a_0 是GaSb的晶格常数, θ 由下式给出:

构为:GaSb 5.0 nm/InAs L_1 /GaSb L_2 /InAs L_1 /GaSb 5.0 nm。可以看出,三种界面态下的导带基态波函数分布区别不大。当界面采用缓变模型时(缓变层厚为0.4 nm),价带基态波函数分布会发生轻微改变;当在界面上施加界面势时(界面势强度为0.7 eV^[28]),价带基态波函数分布变化比较显著,波函数向施加界面势的界面靠拢并且形状更加尖锐。

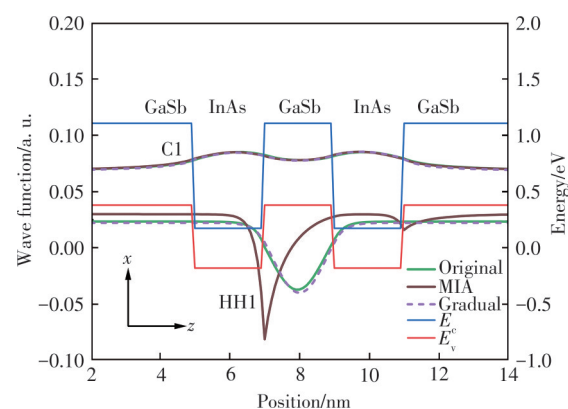


图1 不同界面态下的导带、价带基态波函数分布

Fig.1 Ground-state wave function distributions of conduction band and valence band under different interface states

图2显示了三种界面态InAs/GaSb SL在 Γ 点附近[100]方向和[110]方向上的能带结构。C1、HH1、HH2、LH1分别表示导带电子、第一重空穴、

第二重空穴和轻空穴带。我们可观察到如下信息:由于整个超晶格体系是对称分布的,所以在初始条件下,电子上旋和下旋态是简并的。缓变界面和施加界面势都会破坏体系的对称性。可以看到在考虑缓变界面时,HH1、HH2两个能带会观

察到明显的自旋劈裂现象,而C1与LH1的自旋劈裂很小。在界面处施加界面势时,C1的自旋劈裂很小,而HH1、HH2、LH1的自旋劈裂较大,相比之下,施加界面势时比缓变界面产生的自旋劈裂更为明显。

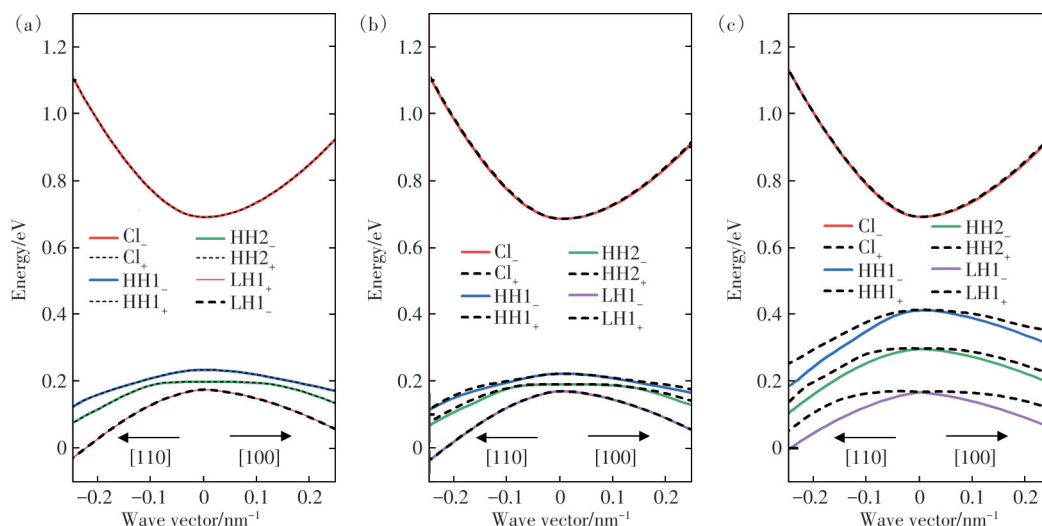


图2 不同界面条件下的色散关系图。(a)陡峭界面的 $E-k$ 关系;(b)缓变界面的 $E-k$ 关系;(c)界面处施加界面势时的 $E-k$ 关系
Fig.2 Dispersion diagram under different interface conditions. (a) $E-k$ relationship when the interface is steep interface. (b) $E-k$ relationship when the interface is gradually modified. (c) $E-k$ relationship when the interface potential is applied

图3显示了改变SL结构参数对带隙的影响。通过改变势阱厚度可以看到,缓变界面的带隙计算结果略低于不做陡峭界面的结果,而界面势的带隙计算结果则明显低于陡峭界面的结果。通过改变势垒厚度可以看到,势垒厚度

增大缓变界面与陡峭界面的带隙计算结果逐渐降低,并且随着厚度增加带隙趋于收敛;而界面势的带隙计算结果随着势垒厚度的增大而增大,这与前两者呈现相反的趋势,与文献中的实验结果吻合^[22]。

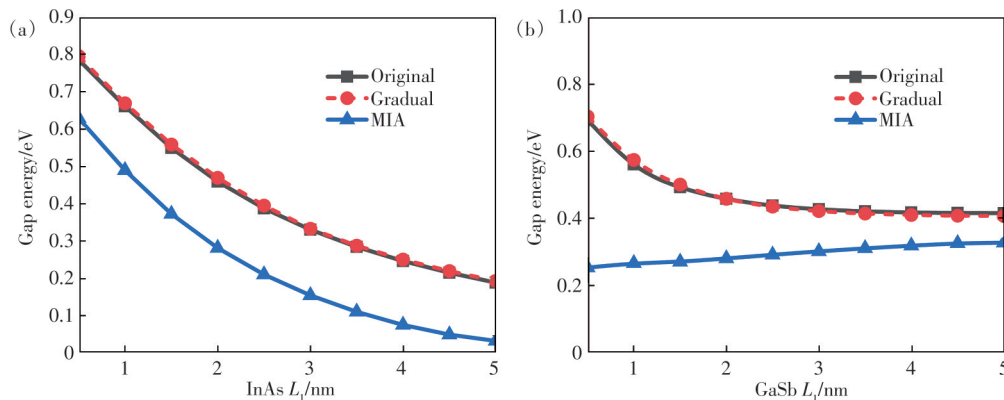


图3 (a)改变InAs势阱厚度对带隙的影响;(b)改变GaSb势垒厚度对带隙的影响

Fig.3 (a) Effect of changing the InAs well thickness on the band gap. (b) Effect of changing the GaSb barrier thickness on the band gap

图4显示了在固定阱宽的条件下,改变界面态强度时对波函数的影响。从图4(a)可以看出,随着缓变层厚增加,导带波函数无明显变化,而价带波函数逐渐向远离界面的方向移动。图4(b)显示了改变界面势强度时,当界面势强度增大,导

带波函数同样无明显变化,但价带波函数形状逐渐变尖锐,而且朝着界面方向靠近。

图5显示了在不同阱宽下,改变界面态强度对带隙的影响。从图5(a)可以看出,当InAs势阱宽度取1.0 nm、2.0 nm时,随着缓变层厚增加,带

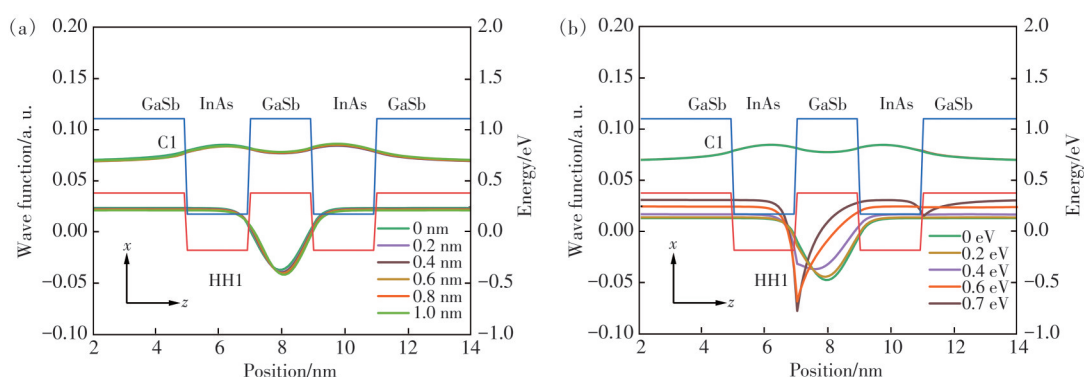


图4 (a)改变缓变层厚度对波函数的影响;(b)改变界面势强度对波函数的影响

Fig.4 (a)The effect of changing the thickness of the gradual layer on the wave function. (b)The effect of changing the interface potential strength on the wave function

隙逐渐降低,在缓变层厚为 0.2 nm 时达到最小值,之后带隙随着缓变层厚的增加而线性增加;当 InAs 势阱宽度取 3.0 nm 时,随着缓变层厚增加,带隙逐渐减小,在缓变层厚为 0.2 nm 之后带隙随着缓变层厚的增加而线性减小。图 5(b)显示了

当 InAs 势阱宽度取 1.0 nm、2.0 nm 时,随着界面势强度增加,带隙逐渐减小;而 InAs 势阱宽度取 3.0 nm 时,随着界面势强度增加,带隙逐渐增加。结合波函数图像可以得到,界面态对超晶格电子结构的影响程度与超晶格的结构参数紧密相关。

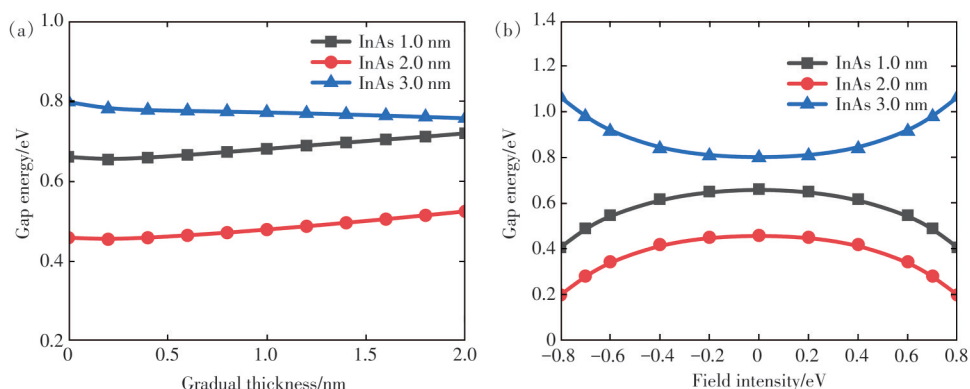


图5 (a)改变缓变层厚度对带隙的影响;(b)改变界面势强度对带隙的影响

Fig.5 (a)The effect of changing the thickness of the gradual layer on the band gap. (b)The effect of changing the interface potential strength on the band gap

4 结 论

针对中红外谱段重要的 InAs/GaSb II 型 SL 结构,我们在理论上系统地研究了不同类型的界面态对其能态的影响。理论计算表明,缓变界面和界面势两种界面态都会导致重空穴带的自旋劈裂,而只有施加界面势时才会使得轻空穴带发生自旋劈裂。除此之外,还研究了改变阱宽和改变势垒时 SL 体系带隙的变化趋势。结果表明,势垒厚度增大缓变界面与陡峭界面的带隙计算结果逐渐降低,并且随着厚度增加带隙趋于收敛,而施加界面势的带隙计算结果随着势垒厚度的增大而增大,这与前两者呈现相反的趋势。当 InAs 势阱宽度取 1.0 nm、2.0 nm 时,

随着缓变层厚增加,带隙逐渐降低,在缓变层厚为 0.2 nm 时达到最小值,之后带隙随着缓变层厚增加而线性增加;当 InAs 势阱宽度取 3.0 nm 时,随着缓变层厚增加,带隙逐渐减小,在缓变层厚为 0.2 nm 之后带隙随着缓变层厚增加而线性减小。当 InAs 势阱宽度取 1.0 nm、2.0 nm 时,随着界面势强度增加,带隙逐渐减小;而 InAs 势阱宽度取 3.0 nm 时,随着界面势强度增加,带隙逐渐增加。该结果为中红外 SL 器件设计提供了可参考的理论基础。

本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240054>.

参 考 文 献:

- [1] SMITH D L, MAILHIOT C. Theory of semiconductor superlattice electronic structure [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1990, 62(1): 173-234.
- [2] LI L L, XU W, ZHANG J, *et al.* Midinfrared absorption by InAs/GaSb type- II superlattices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 105(1): 013115.
- [3] WEI Y, GIN A, RAZEGHI M, *et al.* Advanced InAs/GaSb superlattice photovoltaic detectors for very long wavelength infrared applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(18): 3262-3264.
- [4] 周天明, 张宝林, 蒋红, 等. InAs 和 InAs/GaSb 异质结的 MOCVD 生长和表征 [J]. *发光学报*, 1997, 18(3): 223-227.
ZHOU T M, ZHANG B L, JIANG H, *et al.* Growth and characterization of the mocvd grown InAs and InAs/GaSb heterostructure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 1997, 18(3): 223-227. (in Chinese)
- [5] HAUGAN H J, SZMULOWICZ F, MAHALINGAM K, *et al.* Short-period InAs/GaSb type- II superlattices for mid-infrared detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(26): 261106.
- [6] SCHULMAN J N, CHANG Y C. Band mixing in semiconductor superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 1985, 31(4): 2056-2068.
- [7] WANG L W, WEI S H, MATTILA T, *et al.* Multiband coupling and electronic structure of $(\text{InAs})_n/(\text{GaSb})_n$ superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, 60(8): 5590-5596.
- [8] ALTARELLI M. Electronic structure and semiconductor-semimetal transition in InAs-GaSb superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, 28(2): 842-845.
- [9] POPELÁŘ T. *Ultrafast Laser Spectroscopy of Semiconductors* [J]. Prague: Charles University, 2022.
- [10] SIRTORI C, CAPASSO F, FAIST J, *et al.* Nonparabolicity and a sum rule associated with bound-to-bound and bound-to-continuum intersubband transitions in quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1994, 50(12): 8663-8674.
- [11] BURT M G. The justification for applying the effective-mass approximation to microstructures [J]. *J. Phys. Condens. Matter.*, 1992, 4(32): 6651-6690.
- [12] FOREMAN B A. Effective-mass Hamiltonian and boundary conditions for the valence bands of semiconductor microstructures [J]. *Phys. Rev. B*, 1993, 48(7): 4964-4967.
- [13] CHUANG S L. Efficient band-structure calculations of strained quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1991, 43(12): 9649-9661.
- [14] ZIBERI B, FROST F, HÖCHE T, *et al.* Ripple pattern formation on silicon surfaces by low-energy ion-beam erosion: experiment and theory [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 72(23): 235310.
- [15] HUANG Q, YU D L, ZHAO Z S, *et al.* First-principles study of O-BN: a sp^3 bonding boron nitride allotrope [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, 112(5): 053518.
- [16] MA X P, LI K W, ZHANG Z Y, *et al.* Stable finite element method of eight-band $k \cdot p$ model without spurious solutions and numerical study of interfaces in heterostructures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 116(23): 235702.
- [17] BENNETT B R, SHANABROOK B V, WAGNER R J, *et al.* Interface composition control in InAs/GaSb superlattices [J]. *Solid-State Electron.*, 1994, 37(4-6): 733-737.
- [18] LAU W H, FLATTÉ M E. Effect of interface structure on the optical properties of InAs/GaSb laser active regions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(10): 1683-1685.
- [19] KREBS O, VOISIN P. Giant optical anisotropy of semiconductor heterostructures with no common atom and the quantum-confined Pockels effect [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77(9): 1829-1832.
- [20] IVCHENKO E L, KAMINSKI A Y, RÖSSLER U. Heavy-light hole mixing at zinc-blende (001) interfaces under normal incidence [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, 54(8): 5852-5859.
- [21] LI L L, XU W, PEETERS F M. Intrinsic optical anisotropy of [001]-grown short-period InAs/GaSb superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, 82(23): 235422.
- [22] DONG H M, LI L L, XU W, *et al.* Effect of microscopic interface asymmetry on optical properties of short-period InAs/GaSb type-II superlattices [J]. *Thin Solid Films*, 2015, 589: 388-395.
- [23] DELMAS M, LIANG B L, HUFFAKER D L. A comprehensive set of simulation tools to model and design high-performance

- type-II InAs/GaSb superlattice infrared detectors [C]. *Proceedings of SPIE 10926, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVI, San Francisco*, 2019: 109260G.
- [24] ZHAO Y H, ZHANG J C, CAI C Y, *et al.* Domino effect of thickness fluctuation on subband structure and electron transport within semiconductor cascade structures [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(37): 41950-41959.
- [25] MILES R H, SCHULMAN J N, CHOW D H, *et al.* Electronic band structure of far-infrared $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}/\text{InAs}$ superlattices [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, 8(1S): S102-S105.
- [26] THIBADO P M, BENNETT B R, TWIGG M E, *et al.* Origins of interfacial disorder in GaSb/InAs superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(24): 3578-3580.
- [27] HAUGAN H J, MAHALINGAM K, BROWN G J, *et al.* Growth of short-period InAs/GaSb superlattices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100(12): 123110.
- [28] HAUGAN H J, BROWN G J, SZMULOWICZ F, *et al.* InAs/GaSb type-II superlattices for high performance mid-infrared detectors [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, 278(1-4): 198-202.



马泽军(1999-),男,河北衡水人,硕士研究生,2021年于燕山大学获得学士学位,主要从事红外光电器件理论的研究。

E-mail: mazejun@semi.ac.cn



李远(1988-),男,河北保定人,博士,副研究员,2016年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件的物理与应用的研究。

E-mail: yuanli@semi.ac.cn