

Title	Simulation and Design of Infrared Photodetector Using Type II InAs/GaSb Superlattice
Author(s)	Le, Thi Yen
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/73553
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

Abstract of Thesis

Name (Le Thi Yen)	
Title	Simulation and Design of Infrared Photodetector Using Type II InAs/GaSb Superlattice (InAs/GaSbタイプII超格子を用いた赤外線検出素子のシミュレーションと設計に関する研究)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>In the state-of-the-art infrared imaging technology, HgCdTe is the most prevalent material used in high-performance infrared photodetectors. However, it has disadvantages such as containing hazard heavy metals and costly fabrication process. To overcome such disadvantages, the InAs/GaSb type II superlattice (T2SL) has caught wide attention recently. In this study, a simulation framework was developed to investigate the properties of InAs/GaSb T2SL for detecting light in the mid wavelength infrared region. The effect of unipolar barrier structure was also evaluated, which could significantly improve the dark current characteristics of the infrared photodetectors.</p> <p>Firstly, $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ band calculation and drift-diffusion device simulator were implemented in sequence to evaluate the dark current. Simulation results demonstrated that the leakage current of the infrared photodiode depends on the T2SL thickness ratio even with the same cut-off wavelength of 5 μm. Especially, it has been shown that in the low reverse bias conditions at 77 K the 'InAs-rich' T2SL detectors exhibit smaller dark current than the 'GaSb-rich' ones, which results from the difference in the intrinsic carrier density. Moreover, under the higher voltage and the higher doping level, the larger effective mass of 'GaSb-rich' T2SL can suppress the dark current induced by the tunneling-related current leakage mechanisms.</p> <p>Secondly, the properties of InAs/GaSb T2SL with various composition periods were investigated based on the $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ band calculation. Considering the application of infrared photodetectors, the essential material parameters were evaluated from the electronic band structure as a function of the width of InAs and GaSb layers. Under the dark condition, the smaller effective mass in short period T2SL (especially with small GaSb layer width) could result in the reduction of the Shockley-Read-Hall leakage current which is proportional to the intrinsic carrier density. However, the increase of the dark current due to the enhanced band-to-band tunneling is also concerned in high electric field conditions. On the other hand, in terms of the quantum efficiency, the smaller effective mass results in the smaller joint density of states, which compensates the contribution of the large optical matrix elements to the absorption coefficient in short period T2SL.</p> <p>Thirdly, the performance of the barrier infrared photodetectors was investigated using the simulation framework. Two different structures, i.e., p-barrier-n (pBn) and n-barrier-n (nBn), were evaluated and compared to the conventional p-i-n photodiode without the barrier layer. In this study, the barrier and active regions were designed with the same binary material using InAs/GaSb T2SL, whose bandgap was engineered by changing the composition ratio. The simulation results suggested that both pBn and nBn structures could reduce the dark current, but the mechanisms for the current leakage are different, and hence the different strategies are required to optimize the doping density in the barrier region.</p> <p>In summary, the characteristics of the infrared photodetectors using InAs/GaSb type II superlattices have been investigated by using the simulation framework developed in this study. The physical mechanisms related to the dark current and the quantum efficiency were clarified, which could contribute to design the higher performance infrared photodetectors.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (LE THI YEN)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	(教授)	森伸也
	副 査	(教授)	渡部平司
	副 査	(教授)	片山竜二
	副 査	(教授)	森川良忠
	副 査	(招へい教授)	鎌倉良成

論文審査の結果の要旨

本論文は InAs/GaSb タイプ II 超格子を用いた赤外線検出素子のシミュレーションと設計に関する研究の成果をまとめたものであり、以下の 5 章で構成されている。

第 1 章では、研究背景および本研究の目的について述べている。

第 2 章では、InAs/GaSb タイプ II 超格子を用いた赤外線検出素子をシミュレーションするため構築した方法論、およびそれを応用し得られた知見について述べている。本研究では、 $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 摂動法に基づくバンド計算から抽出したパラメータをドリフト-拡散型デバイスシミュレータに取り入れることで、様々な積層周期あるいは積層比を有する超格子を用いた赤外線検出素子の特性を調べ、たとえ同一のカットオフ波長を有する場合でも超格子の積層比により暗電流特性が異なることを示している。また、特に低バイアス条件下では、InAs 層の比率の高い超格子ほど暗電流を抑制できる傾向があり、その原因が真性キャリア密度の違いにあることを明らかにしている。一方で、受光層のドーピング濃度が高い素子に大きな逆バイアスを加えた場合には、逆に GaSb 層の比率の高い超格子ほど暗電流を低減できる可能性があることを指摘し、キャリア有効質量が重いことがトンネリングに起因するリーク電流抑制に繋がるとの見解を示している。

第 3 章では、第 2 章の議論を発展させ、より系統的に InAs/GaSb タイプ II 超格子の諸特性を考察した結果について述べている。 $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 摂動法に基づくバンド計算に基づき、赤外線検出素子の性能に関わる各種パラメータの変化を InAs 層と GaSb 層の厚さの関数として調べた結果、暗電流性能に対しては、短周期の超格子、とりわけ GaSb 層の薄い構造が有利であるとの考えを示している。これは、Shockley Read Hall 機構に基づくリーク電流が、キャリア有効質量の軽い、すなわち小さい真性キャリア密度を有する場合ほど抑制されるためであり、逆に高電界下においてこの性質はトンネル電流を増大させる懸念要因となり得ることも指摘している。さらに本章では、受光特性についても議論を展開し、超格子の短周期化に伴うキャリア有効質量の減少は、結合状態密度すなわち光吸収係数の低下を招くため、量子効率向上という観点からは不利となることを論じている。

第 4 章では、内部に障壁層を設けた赤外線検出素子の特性および設計指針について述べている。具体的構造としてこれまで提案されている pBn および nBn 構造を取り上げ、本研究で構築したシミュレーションフレームワークを活用しながら障壁層のドーピング濃度の最適化について考察した結果、暗電流を抑制するためには両構造とも最適なドーピング濃度が存在することを見出している。さらに、暗電流の主要因はそれぞれの構造で異なることから、リーク電流に関連する物理機構を想定した上での素子設計が重要となることを主張している。

第 5 章では、本論文を通して得られた結果をまとめ、結論を述べている。

以上のように、本論文では InAs/GaSb タイプ II 超格子を用いた赤外線検出素子の解析を行うため構築したシミュレーションフレームワークについて述べるとともに、そのシミュレータを赤外線検出素子の設計に応用した事例について

も議論を展開している。さらに超格子の積層周期や素子のドーピング濃度が素子性能に与える影響を系統的に調べ、その物理機構についても深い考察を与えている。これらの新たな知見は、InAs/GaSbタイプII超格子を用いた赤外線検出素子を設計する際の指針策定、ならびに計算機支援による半導体素子設計技術の発展に大きく資するものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。