

令和 元年 6 月 20 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17511

研究課題名(和文)フォノン閉じ込めによる太陽電池エネルギー変換効率向上策の提案

研究課題名(英文)Proposal of improving energy conversion efficiency of solar cell by phonon confinement

研究代表者

MA BEI (MA, BEI)

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90718420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：(1)AlGaIn系量子井戸構造を想定し、フォノン局在性をパラメーターとして、光学フォノンと音響フォノンを比較した結果、光学フォノンのほうがキャリア取り出し率に最も影響することが判明した。

(2)高密度SiドープGaIn薄膜において空間的な電子濃度分布

赤外反射スペクトルに基づき、フィッティング解析を行った結果、ホール測定で見積った電子濃度 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の試料(膜厚 $1 \mu\text{m}$)が深さ方向の電子濃度分布の変化がみられた。ラマン分光のスペクトルより、ドーピングによる結晶性劣化やSiのN位置の占有によるアクセプタ準位の形成や格子間位置へのドーピングによる表面方向への電子濃度低減が考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子井戸構造のフォノン・キャリア動的過程計算では、光学フォノンを制御することで、励起子発光の効率改善を示した。薄膜の測定結果では、電子濃度の空間的解析を行った。材料中の転位や不純物の空間濃度解析はそれらの制御、フォノンバンド構造制御等による空間的フォノン輸送制御に役に立つ。

研究成果の概要(英文)：(1) Assuming an AlGaIn-based quantum well structure and phonon localization as a parameter and comparing optical phonons with acoustic phonons, it has been found that the optical phonon has the most influence on the carrier extraction rate.

(2) electron concentration distribution in high density Si-doped GaIn films

As a result of fitting analysis based on the infrared reflection spectrum, a changing in the electron concentration distribution in the depth direction was obtained for the sample with an electron concentration of $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ estimated by Hall measurement. From the spectrum of Raman spectroscopy, it is considered that in the high electron concentration sample, the crystallinity deterioration due to doping, the formation of the acceptor level due to the occupation of the N position of Si, and the electron concentration reduction towards the surface due to the doping to the interstitial site.

研究分野：半導体

キーワード：フォノン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電は持続可能社会のエネルギー源として開発が進んでいる。しかし、太陽光電力変換効率の最高値は2009年以降5%の増加(=46%)であり、今後の増加は加速度的に困難となる。また、旧来のタンデム数増加という開発方針は天候変化に対する値を下げる方向となり、方針転換が必要と思われる。

2. 研究の目的

エネルギー損失の根源である熱発生に着目し、その本性である格子振動波(フォノン)を逆に利用してフォノン閉込めによる量子井戸型太陽電池の飛躍的増加を狙う。このために、不純物の空間濃度制御、フォノンバンド構造制御等による空間的フォノン輸送制御を理論・実験両面から研究する

3. 研究の方法

窒化物半導体の励起子生成発光の数値計算は励起子準位間の励起・脱励起、励起子解離・生成、電子衝突、フォノン過程(極性光学フォノン散乱、変形ポテンシャル散乱、ピエゾ電気散乱)を取り入れ、フェルミの黄金則を用いた。薄膜評価方法として、時間分解フォトルミネッセンス(TRPL)ホール測定、電子走査顕微鏡(SEM)、赤外分光法(IR)、ラマン分光法などを用いた。

4. 研究成果

(1)量子井戸構造のフォノン・キャリア動的過程計算

AlGaIn系量子井戸構造を想定し、井戸内のピエゾ電解、自発内部電界を取り入れ、キャリア・フォノン・励起子の動的過程の変化機構の一部を解明した。量子構造はヘテロ構造によりフォノン閉じ込めが強められると同時に、電子・正孔の波動関数の重なりが増え、発光再結合が増加すると証明した。さらに、フォノン局在性をパラメーターとして、光学フォノンと音響フォノンを比較した結果、音響フォノン密度が光学フォノンより2桁高いにも関わらず、光学フォノンのほうがキャリア取り出し率に最も影響することが判明した。その光学フォノン局在寿命を2桁変化させた場合、励起子として、キャリア取り出し効率向上の可能性について、シミュレーションで検証し、励起子へ影響は長時間に継続した。

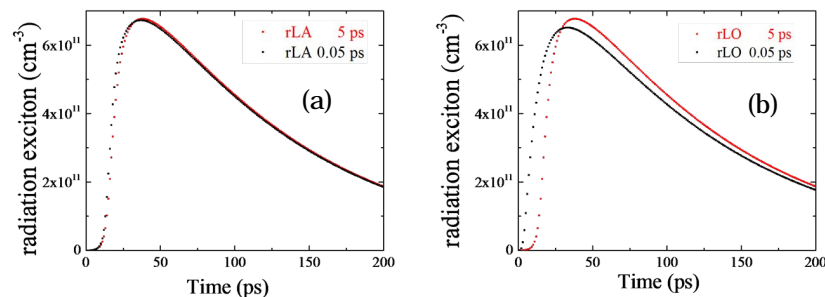


図1 励起子発光 (a) LA フォノン寿命変化 (b) LO フォノン寿命変化

(2)高密度 Si ドープ GaN 薄膜において空間的な電子濃度分布

ホール効果測定から見積もられた電子濃度が $n_e(H)=0.7 \sim 3.0E20cm^{-3}$ 程度の Si ドープ GaN 薄膜について赤外反射測定を行った。転送行列法を用いて電子濃度が深さ方向に分布する層状のモデルを用い、LO フォノンプラズモン結合(LOPC)モードを配慮して解析を行った結果、深さ方向の電子濃度分布にドーピング密度による変化が観測された。低電子濃度試料ではほぼ均一または表面に近づくに連れて電子密度が高くなり、高電子濃度試料では表面に近づくに連れて電子濃度が低くなる結果が得られた。ラマン散乱の E2H ピークエネルギーのサンプル深さ方向の変化を調べた結果、 $n_e(H) = 3E20 cm^{-3}$ の試料が最も大きく変化している。ラマン散乱においては主に振動する原子が V 族 III 族で異なる E2L、E2H のモードに依存した変化が見られたことから、高電子濃度試料ではドーピングによる結晶性劣化や Si の N 位置の占有によるアクセプタ準位の形成や格子間位置へのドーピングによる表面方向への電子濃度低減が考えられる。材料中の転位や不純物の空間濃度解析はそれらの制御、フォノンバンド構造制御等による空間的フォノン輸送制御に役に立つ。

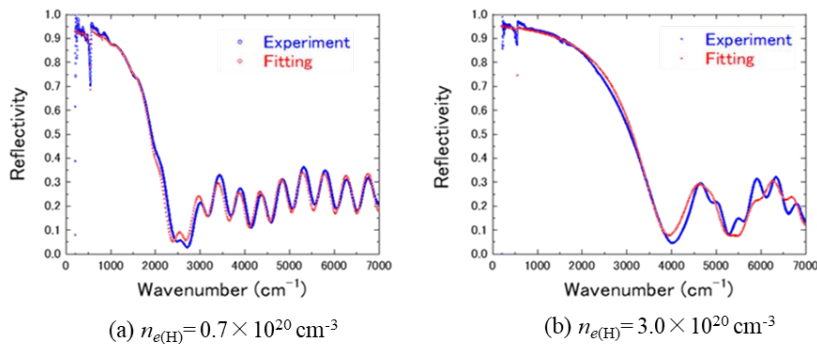


図2 赤外分光反射測定及びフィッティング結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

1. Chunyan Jiang, Yan Chen, Jiangman Sun, Liang Jing, Mengmeng Liu, Ting Liu, Yan Pan, Xiong Pu, Bei Ma, Weiguo Hu, Zhong Lin Wang, “Enhanced photocurrent in InGaN/GaN MQWs solar cells by coupling plasmonic with piezo-phototronic effect”, Nano Energy 57 (2019) 300–306 査読有り
2. H. Sakamoto, E. Takeuchi, K. Yoshida, K. Morita, B. Ma, and Y. Ishitani, “Electric-dipole absorption resonating with longitudinal optical phonon-plasmon system and its effect on dispersion relations of interface phonon polariton modes in metal/semiconductor-stripe structures”, Journal of Physics D 51, 015105 (10pp.) (2017) 査読有り
3. K. Oki, B. Ma, and Y. Ishitani, “Population decay and distribution of exciton states analyzed by rate equations based on theoretical phononic and electron-collisional rate coefficients”, Physical Review B 96, 205204 (15pp.) (2017) 査読有り
4. Zhenfu Zhao, Chunyan Jiang, Xiong Pu, Chunhua Du, Linxuan Li, Bei Ma, and Weiguo Hu, “Robust Pb²⁺ sensor based on flexible ZnO/ZnS core-shell nanoarrays”, Appl. Phys. Lett. 108, 153104 (2016) 査読有り
5. Hironori Sakamoto, Bei Ma, Ken Morita and Yoshihiro Ishitani, “Raman study of the quantum interference of multiple discrete states and a continuum of states in the phonon energy region of semiconductors: examples of p-type Ga_{0.5}In_{0.5}P films”, J.Phys. D 49, 351107 (pp.1-13) (2016) 査読有り
6. H. Sakamoto, B. Ma, K. Morita and Y. Ishitani, “Raman study of the quantum interference of multiple discrete states and a continuum of states in phonon energy region of semiconductors: examples of p-type Ga_{0.5}In_{0.5}P films”, J.Phys. D 49, 351107 (13pp.) (2016) 査読有り
7. Y. Ishitani, K. Takeuchi, N. Oizumi, H. Sakamoto, B. Ma, K. Morita, H. Miyake, and K. Hiramatsu, “Excitation and de-excitation dynamics of excitons in a GaN film based on the analysis of radiation from high-order states”, J. Phys. D 49, 245102 (13pp.) (2016) 査読有り
8. T. Iwahori, B. Ma, K. Morita, and Y. Ishitani, “Theoretical investigation of non-thermal equilibrium exciton dynamics in GaN based on hydrogen plasma model”, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 05FM06 (6 pp.) (2016) 査読有り
9. T. Kamijoh, B. Ma, K. Morita, and Y. Ishitani, “Depth profile characterization technique of electron density in GaN films by infrared reflection spectra”, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 05FH02 (6 pp.) (2016) 査読有り

〔学会発表〕(計 30 件)

1. 菊地 萌, 上原大輔, 馬 菴, 森田 健, 三宅秀人, 石谷善博, 「GaN の深い準位の直接光励起による発光特性の考察」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学 2019 年 3 月 9 日 - 12 日
2. 湯 明川, 馬 菴, 森田 健, 上野耕平, 小林 篤, 藤岡洋, 石谷善博, 「高濃度 Si ドープ GaN の深さ方向結晶性の赤外およびラマン分光評価」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学 2019 年 3 月 9 日 - 12 日
3. 大木 健輔, 野町 健太郎, 西川 智秀, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「GaN, AlN, ZnO における励起子の非熱平衡解析」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学 2019

年 3 月 9 日 - 12 日

4. 湯 明川, 馬 べい, 森田 健, 石谷 善博, 「赤外分光法による GaN の高電子密度層の空間分布評価」, テラヘルツ科学の最先端 V, 千葉大学 2018 年 12 月 6 日-7 日
5. 齋藤 直道, 瀧口 佳祐, 馬 菴, 森田 健, 飯田 大輔, 大川 和宏, 石谷 善博, 「ラマン散乱マッピングによる InGaN の局所フォノン場評価」, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会名古屋国際会議場, 2018 年 9 月 18-21 日
6. 大木 健輔, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「ワイドギャップ半導体における励起子-フォノン系の非熱平衡解析」, 第 2 回フォノンエンジニアリング研究会, 7 月 13,14 日, 2018 年, ホテル KKR 熱海
7. Bei Ma and Yoshihiro Ishitani, “Simulation of transient carrier-exciton-phonon energy transport in GaN”, ICNS 12 - 12th International Conference on Nitride Semiconductors, Strasbourg, France, July 24 - 28, 2017
8. Bei Ma, Tsubasa Yamakawa, and Yoshihiro Ishitani, “C Exciton and A Exciton Dynamic of m-Plane GaN Film”, 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices, Banff, Alberta, Canada, October 8 - 12, 2017
9. Yoshihiro Ishitani, Kensuke Oki, Naomichi Saito, Tsubasa Yamakawa, Daisuke Uehara, Shungo Okamoto, Moe Kikuchi, Keisuke Ebisawa, Bojin Lin, Bei Ma, and Ken Morita, “Interactions of phonon, electron, and photon in nitride semiconductors”, Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors, 18-20 November, 2018, Tohoku University (Invited)
10. Yoshihiro Ishitani, Kensuke Oki, Tsubasa Yamakawa, Bojin Lin, Bei Ma, and Ken Morita, “Statistics of excitonic energy states based on phonon-exciton-radiation model”, International Workshop on Nitride Semiconductors, October 2018, Kanazawa, Japan
11. 野町 健太郎, 大木 健輔, 馬 べい, 森田 健, 石谷 善博, 「GaN における定常状態励起子分子準位間遷移過程理論計算」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14-17 日
12. 松本 大, 馬 べい, 森田 健, 福井 一俊, 木村 真一, 飯塚 拓也, 石谷 善博, 「磁場下赤外反射分光による InN 電子有効質量の解析」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14-17 日
13. 大木 健輔, 野町健太郎, 馬 菴, 森田健, 石谷善博, 「GaN における励起子及び自由キャリアの密度とレート係数の理論計算」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14-17 日
14. 竹内 映人, 坂本 裕則, 馬 べい, 森田 健, 石谷 善博, 「金属/半導体複合構造における LO フォノン-プラズモン結合モード共鳴赤外光吸収とポラリトン損失」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14-17
15. 坂本 裕則, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「AIN/金属ストライプ構造のラマン散乱スペクトルにおける A1-E1 選択則の崩れに関する検討」, 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14-17 日
16. 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「p 型 Ga_{0.5}In_{0.5}P における複数種 LO 準位と電子遷移系の量子干渉効果」, 坂本 裕則, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、2016 年 3 月 19-22 日
17. 上條 隆明, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「赤外反射分光による GaN 薄膜の電子特性深さ分解評価手法」, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2016 年 3 月 19-22 日
18. 岩堀 友洋, 野町 健太郎, 大木 健輔, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「GaN における非熱平衡系励起子遷移過程のフォノン・衝突・輻射モデルに基づく解析」, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2016 年 3 月 19-22 日
19. 竹内 和真, 大泉 尚之, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 三宅 秀人, 平松 和政, 「高次励起子準位を用いた GaN における励起子の励起・脱励起ダイナミクス解析」, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2016 年 3 月 19-22 日
20. Hironori Sakamoto, Bei Ma, Ken Morita, Yoshihiro Ishitani, “Quantum interference of three LO modes in p-type Ga_{0.5}In_{0.5}P: Contribution of a trigonal phonon mode”, MoP-ISCS-052, ISCS2016, Toyama, June 25 - 30, 2016
21. 坂本 裕則, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「p 型 Ga_{0.5}In_{0.5}P における高濃度 p 型ドーパ試料におけるフォノン系電磁誘起透明化のスペクトル計算」, 2016 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2016 年 9 月 13-16 日
22. 竹内 映人, 馬 菴, 森田 健, 石谷 善博, 「半導体/金属複合構造における LO フォノン-プラズモン結合モードでの赤外光吸収」, 2016 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2016 年 9 月 13-16 日
23. 馬 べい, 森田 健, 石谷 善博, 「GaN における定常状態励起子分子準位間遷移過程理論計算」, 野町健太郎, 岩堀友洋, 大木 健輔, 第 8 回窒化物半導体結晶成長講演会、京都大学、2016 年 5 月 9-10 日
24. Kentaro Nomachi, Tomohiro Iwahori, Kensuke Oki, Bei Ma, Ken Morita, and Yoshihiro

- Ishitani, "Introducing of Biexciton Processes into Exciton Dynamics Simulation for GaN Based on Collisional Phononic and Radiative Model", WeB1-5, CSW2016, Toyama, June 25 – 30, 2016
25. 野町健太郎,岩堀友洋, 大木健輔, 馬ベイ, 森田健, 石谷善博, 「GaNにおける励起子・励起子分子準位間遷移過程の理論計算」, 2016年 第78回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2016年9月13-16日
 26. 馬 蓓, 三宅 秀人, 平松 和政, 石谷 善博, 「フォノンの吸放出による電子・励起子系エネルギーの励起過程」, 2016年 第78回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2016年9月13-16日
 27. Bei Ma and Yoshihiro Ishitani, "Simulation of carrier-exciton-phonon dynamics in GaN in non-equilibrium state", D2.2.10, Nitride Semiconductors (IWN 2016) October 2-7, 2016, Hilton Orlando Lake Buena Vista, Orlando, Florida.
 28. 馬 蓓, 竹内 和真, 石谷 善博, 三宅 秀人, 平松 和政, 「非熱平衡態における GaN 励起子ダイナミクスの実験解析及び数値計算」, 第8回窒化物半導体結晶成長講演会、京都大学、2016年5月9-10日
 29. 坂本 裕則、馬蓓, 森田 健, 石谷 善博, 「ラマン散乱スペクトルにおけるファノ干渉を用いた窒化物半導体の正孔濃度評価モデルの検討」, 第8回窒化物半導体結晶成長講演会、京都大学、2016年5月9-10日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://photonics.te.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：石谷善博
ローマ字氏名：Yoshihiro Ishitani

研究協力者氏名：三宅秀人
ローマ字氏名：Hideto Miyake

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。