

InGaAs 量子ドット超格子による高効率太陽電池

菅 谷 武 芳

InGaAs Quantum Dot Superlattices for High Efficiency Solar Cells

Takeyoshi SUGAYA

We report ultra-high stacked InGaAs/GaAs quantum dot (QD) superlattice solar cells fabricated using molecular beam epitaxy. We obtain a 400-stack $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ QD structure and a 20-stack QD superlattice without using a strain balancing technique. Photoluminescence (PL) and scanning transmission electron microscope measurements indicate that the $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ QD structure exhibits no dislocations and no crystal defects even after the stacking of 400 QD layers. Moreover, we confirm a miniband formation in a 20-stack QD superlattice by the excitation power dependence in PL measurements. The external quantum efficiency (EQE) and the short-circuit current density of multistacked QD solar cells increase as the number of stacked layers is increased to 150, and the interdot spacing is reduced to 3.5 nm. From the temperature dependence of the EQE for QD solar cells with different interdot spacings, we observe the tunnel current through a miniband in QD superlattices with an interdot spacing of 3.5 nm.

Key words: quantum dot, solar cell, ultra-high stack, miniband, tunnel current, superlattice

東日本大震災による原発事故を契機に、わが国のエネルギー基本計画が抜本的に見直されようとしている。現在は電力エネルギー構成比率で10%に満たない再生可能エネルギーを、従来にも増して活用する期待が高まっており、太陽電池分野では、PV2030+ロードマップに示されているコスト目標7円/kwhに加え、40%を超える大幅な変換効率の向上が必須である。現在の主流である結晶Siでは、量産技術で22%を超える変換効率が達成されているが、理論的には約29%が上限であり、研究レベルにおいてもその値に近づきつつある。40%超の変換効率を実現する太陽電池として、単結晶III-V族化合物半導体をベースとした多接合太陽電池の研究が進んでいる。宇宙用の三接合太陽電池では、集光で40%を超える変換効率が達成されているが^{1,2)}、多接合技術が難しく、またコスト的にも割高になるという問題点が存在する。

量子ドット太陽電池は、その変換効率が集光で60%を超えることが理論的に予測されており³⁾、最近研究がさかんに行われている。これは量子ドット超格子中に形成され

るミニバンド(中間バンド)を利用する新概念の太陽電池であり、単接合セルであるが、中間バンドによって形成される3つのバンドを利用して、太陽光スペクトルを広く吸収しようとするものである。最近、量子ドット超格子作製の研究や、量子ドット太陽電池のプロトタイプデバイスの報告がなされるようになっており、これまでいくつかの研究機関から、母体の半導体より長波長域での光吸収や短絡電流密度の増加が報告されている⁴⁻¹⁰⁾。本稿では、量子ドット太陽電池の基本概念や超格子作製技術、プロトタイプデバイス特性を中心に、われわれの最新の研究成果について紹介を行う。

1. 量子ドット太陽電池の基本概念

図1に、量子ドット太陽電池の模式図を示す。通常のpn接合太陽電池の内部に、量子ドットを周期的に三次元配列した超格子構造を作製する。量子ドット超格子が新たなミニバンド(中間バンド)を形成し、それが母体となる半導体のバンドギャップ中間のエネルギー付近に形成された場

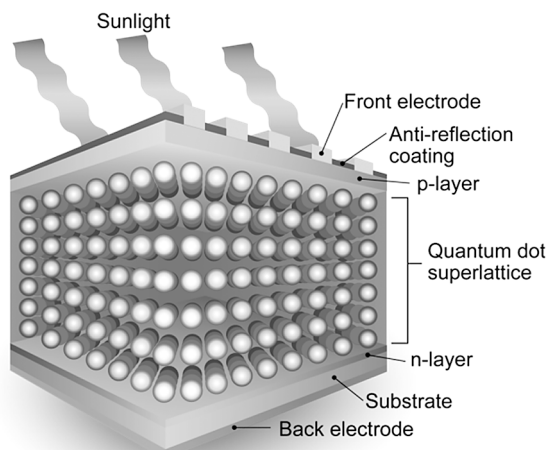


図1 量子ドット太陽電池の模式図.

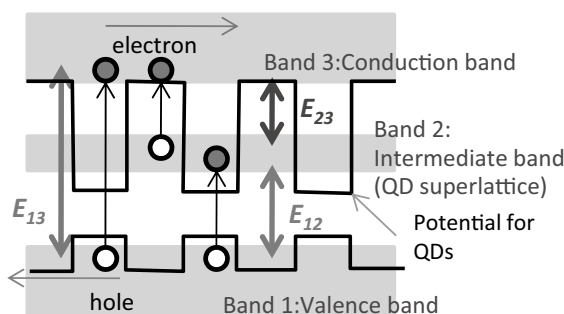


図2 中間バンド太陽電池のバンド構造.

合、図2に示すような3バンド構造を取ることが可能となる。図中の E_{13} は母体の半導体のバンドギャップ、 E_{12} はもとの半導体の価電子帯と中間バンド間のエネルギー差に相当し、 E_{23} は中間バンドと伝導帯間のエネルギー差に相当する。理想的には、 $E_{13}=1.9$ eV、 $E_{12}=1.2$ eV、 $E_{23}=0.7$ eV程度の際に集光で最大効率になると予測されている¹¹⁾。これら3つのバンドのエネルギーをうまく利用することができれば、単接合の量子ドット太陽電池で3接合の太陽電池と同等の太陽光吸収特性をもつことが可能となる。ここで重要なことは、価電子帯から中間バンド、中間バンドから伝導帯への二段階光吸収である。二段階光吸収の実現によって太陽電池の開放電圧 (V_{oc}) が維持され、また短絡電流が増加することにより、理論的には集光で60%以上の変換効率が示唆されている³⁾。しかしながら量子ドットを三次元に規則正しく整列させる結晶成長技術はまだ研究段階であり、その報告例は少ない。現状では分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた自己組織化によるS-K (Stranski-Krastanov) モード成長を利用したIn (Ga) As量子ドット作製技術が最も進んだ成長技術といえる。以下にそれにつ

いて述べる。

2. InGaAs 量子ドット多積層構造の作製

MBEでInAs薄膜を2モノレイヤー (ML) 程度GaAs基板上に成長すると、S-Kモード成長という自己組織化成長が生じ、臨界膜厚を超えた時点でInAs膜が二次元から三次元成長へと変化する。それによってInAs量子ドット構造が形成されるが、InAsとGaAsの格子定数差を利用しているため、格子歪みが結晶内に残留する。多積層化すると格子歪みがさらに蓄積され、結晶内に転位や欠陥が生じる。したがってInAs量子ドット数層の積層は可能であるが、太陽電池構造に必要な多積層成長は不可能となる。例えば、InAs量子ドット層をGaAsバリア層20 nmで4層積層化しただけで、結晶の内部に欠陥や転位が多数形成され、結晶性が急激に悪化する¹²⁾。この特性劣化を防ぐため、歪み補償成長技術が提案されている¹³⁾。太陽電池応用に関しては、例えばInAs量子ドット層間にGaAsよりも格子定数の小さなGaNAs層やGaP層を取り入れることにより、格子定数の大きなInAs層との歪みを補償し、量子ドット層の多積層化が試みられている⁵⁻⁷⁾。しかしながら、特にドット間のバリア層が薄くなった場合に成長技術が難しく、各量子ドット層が電子的に結合した多積層超格子構造の作製はまだ報告されていない。

量子ドット超格子を作製するもうひとつの候補として、InGaAs量子ドットがある。GaAs上のInGaAs層は、1.3 μm 帯の長波長レーザー用薄膜として以前から研究されてきた。有機金属気相成長法による低温成長で、 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ 歪み量子井戸構造により、その臨界膜厚が8 nm (~ 28.3 ML) 程度であることが報告されている¹⁴⁾。GaAs上InAs層の臨界膜厚は1.7 ML程度であるため、InGaAsの場合、InAsに比べてかなり臨界膜厚が大きいことがわかる。InGaAs層においても、In組成を0.3以上にすることで、InAsと同様にGaAs上にS-Kモードによって量子ドットを成長することができる。さらにInGaAsの場合、成長中断を有効に利用すれば、2 nm (7 ML) の成長により、量子ドットが形成できることがわかった¹²⁾。これは前述の臨界膜厚8 nmに比べて非常に少ない成長量である。このような事実から、InGaAs量子ドットの場合GaAsとの格子定数差がInAsに比べて小さいため、多積層化に適している。

図3 (a) は、 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット層を50層、バリア層厚20 nmとして成長したサンプル断面の透過型電子顕微鏡 (TEM) 写真である¹²⁾。(b) はその拡大写真、(c) は成長層再表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真である。歪み補

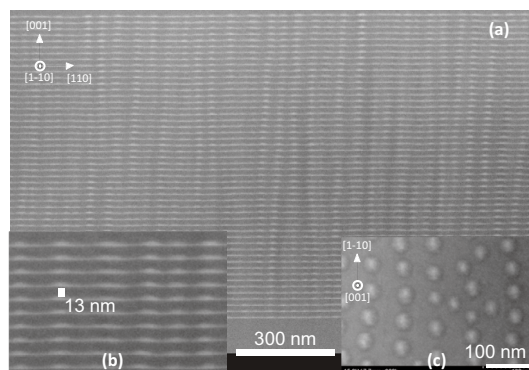


図3 50層積層した $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット. (a)断面TEM写真, (b)拡大図, (c)表面SEM写真.

償層は用いていない. 成長速度は $1\ \mu\text{m}/\text{h}$ である. また, 通常のMBEで用いられる As_4 をクラッキングし, As_2 分子線を用いて成長している. 従来, 高品質量子ドットの作製には, $0.01\ \mu\text{m}/\text{h}$ 程度の低成長速度が必要であると考えられてきた. しかしながら本量子ドットは $1\ \mu\text{m}/\text{h}$ という高成長速度で成長している. 高速成長の場合, As_2 分子線を用いたほうがドットの結晶性がよくなることがわかっている^{15,16}. 太陽電池のように多積層が必要なデバイスの作製には, As_2 分子線による高速成長は非常に重要な技術である. 図3からわかるように, 歪み補償層を用いていないにもかかわらず, 成長方向に規則正しく整列した50層の多積層化に成功している. 前述のようにInAsドットの場合はたった4層で結晶欠陥や転位が形成されるが, InGaAsドットの場合は50層成長してもそれが観察されていない. このように $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドットの場合, 歪み補償層がなくてもかなりの多積層化が可能となる. また図3(c)からわかるように, 50層成長後の表面構造は, [1-10]方向にドットが整列する傾向にあることがみてとれる. 単層の量子ドットの場合はランダムにドットが形成され, このような現象は観察されなかった. これは, 面内でも量子ドットが整列し, 三次元の量子ドット超格子作製の可能性を示唆するものである.

最近, さらに積層数を増加しても, 良好な超多積層量子ドット層が得られることがわかってきた. 図4に, 300層積層した構造の断面TEM写真を示す. 300層積層しても, 結晶中に転位や欠陥は観察されない. 図5は, $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット超多積層構造のフォトルミネセンス(PL)発光強度を低温で比較したものである. 400層まで多積層化した構造を, 20層および30層のものと比較している. 200, 300, 400層のほうが発光強度は強く, 400層積層しても良好な特性が得られることがわかる. 発光ピーク波長の違いはドットサイズの違いによるものである. ま

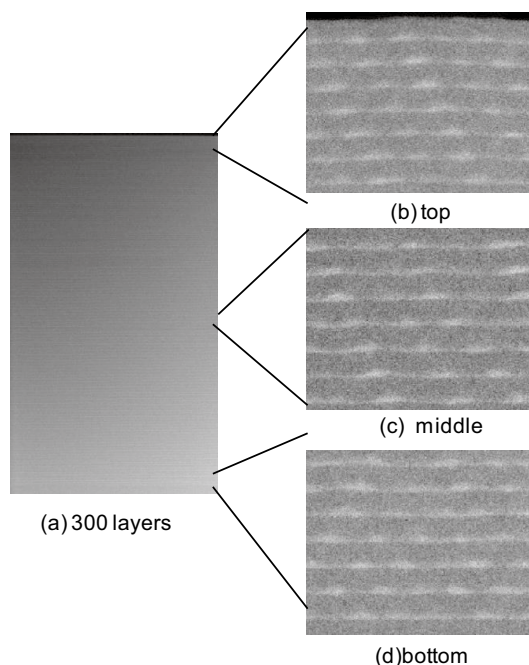


図4 300層積層した $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドットの断面TEM写真とその拡大図.

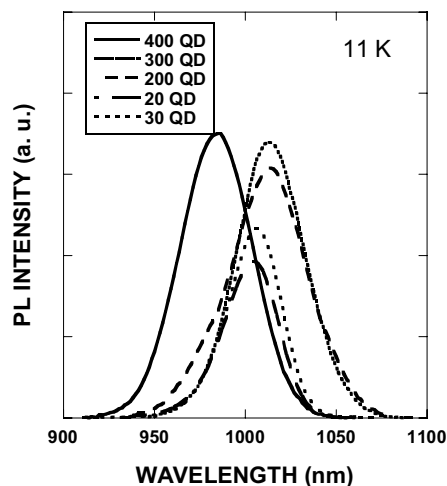


図5 超多積層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット構造の低温PLスペクトル.

た, 400層積層構造の非対称X線プロファイルを測定したところ, 400層量子ドット構造は格子緩和せず, 歪みを保持したまま成長していることもわかった. これは, この超多積層構造が臨界膜厚以内であることを示唆している.

3. InGaAs量子ドット超格子の作製

上述の多積層構造はバリア層が20 nmであり, 図3のTEM写真から, 規則正しく整列しているのがみてとれる. しかしながら超格子という観点からはまだバリア層が厚く, 上下のドット同士は電子的に結合していない. 各量子

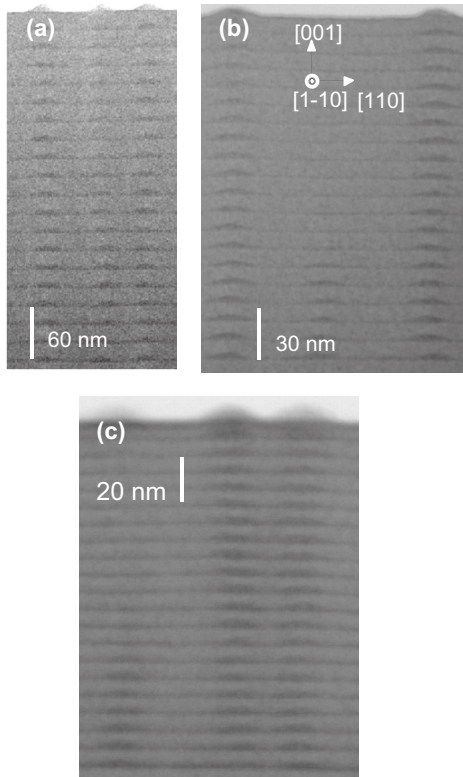


図6 ドット間距離の異なる20層積層した $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット構造。ドット間3.5 nmではミニバンドが形成される。

ドット層が結合し、超格子構造を取るためには、ドット間距離を2~3 nm程度に小さくする必要がある。図6は、 InGaAs 量子ドット層間のバリア層厚を20, 10, 7 nmとして、20層積層したサンプルの断面TEM写真である。(a)はドット高さ5 nm, (b), (c)は3.5 nmで、ドット間がそれぞれ15, 6.5, 3.5 nmであり、20層の量子ドットが成長方向に規則正しく整列している。ここでドット間が3.5 nm程度になるとドット同士が電子的に結合し、ミニバンドの形成が期待される。図7は、図6の多積層ドットのPL励起強度依存性をそれぞれ測定したものである。それぞれの図において、励起強度が $1.9 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ と最も小さい場合、PLの発光半値幅は40 meV以下であった。図7でわかるように、ドット間15 nmのものでは、励起強度を変えてもPL発光波長は全く変化しない。一方、ドット間が6.5 nm, 3.5 nmと減少すると、励起強度を増加した場合発光波長がブルーシフトし、そのシフト量が3.5 nmのもので8 meVと大きくなることが観察された。ドット間が小さくなるとミニバンドが形成され、PLの励起強度を増加するとミニバンドの幅の分だけ発光波長がブルーシフトすることが知られている。ドットのサイズばらつきによってもブルーシフトは観察されるが、われわれの InGaAs 量子ドットの場合、PL半値幅が60 meVを超えるようなサイズ

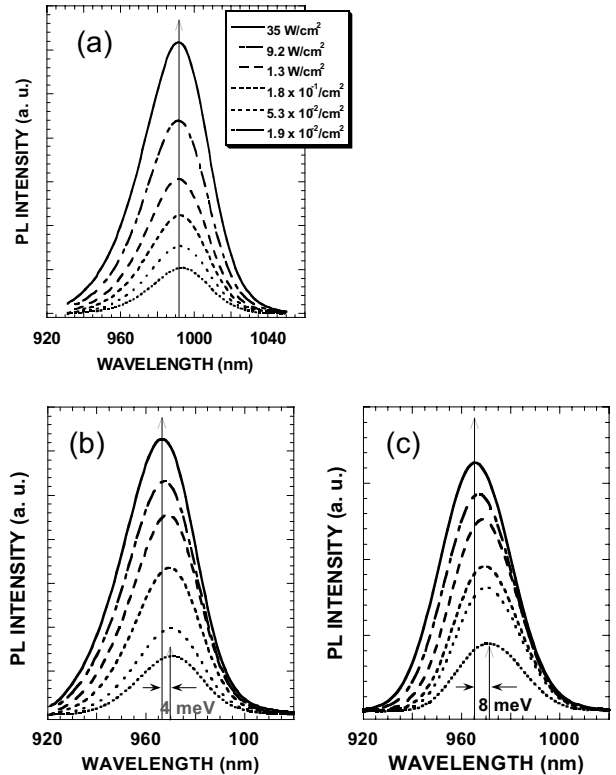


図7 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット超格子のPLスペクトルー励起強度依存性一。

ばらつきをもつ場合のみ、数 meV 程度のブルーシフトが観察された。図7で示すサンプルの発光半値幅は40 meV以下と小さく、サイズばらつきによるブルーシフトは観察されない。また図7(a)のように、ドット間が15 nmの場合にもブルーシフトは全く観察されない。図7(c)におけるブルーシフト量も8 meVとサイズばらつきによる値よりも大きく、その値がドット間距離によって変化することから、これらの結果は量子ドット超格子のミニバンド形成を実験的に確かめたものと考えられる¹⁷⁾。また、ドット間を2 nm程度とさらに小さくした場合には、ブルーシフトが10 meVと増加することも確認している。以上のようにPL励起強度依存性により量子ドット超格子のミニバンド形成が確認されたが、今後はさらにPL励起分光法や発光寿命等の測定により、より詳細にミニバンド形成の実証を行っていく必要がある。

4. InGaAs 量子ドット太陽電池

以上に述べた $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子ドット多積層構造を太陽電池構造に応用した。ドット層を10~150層とし、10~100層のサンプルはバリア層厚20 nm, 150層のものはバリア層12 nmとした。また、10層の量子ドット層で、ドット間距離を35, 15, 6.5, 3.5 nmと変化させたも

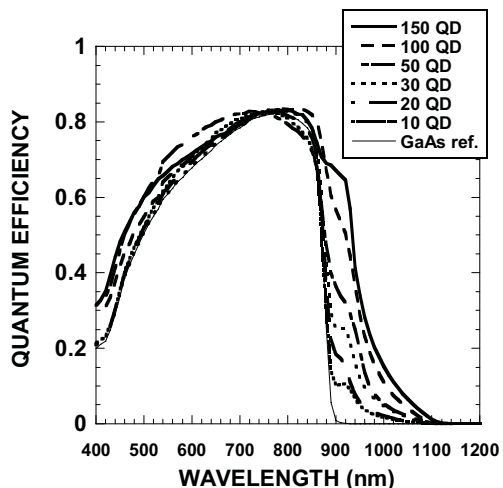


図8 超多積層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット太陽電池の外部量子効率.

のも作製した. 図8に, 量子ドット層数を10~150層と変化させた太陽電池の外部量子効率を示す. レファレンスとしてGaAsのPIN太陽電池の外部量子効率も示した. 図からわかるように, 量子ドット太陽電池の光吸収特性は, GaAsレファレンスセルに比べて長波長側に伸びていることがわかる. また, 量子ドット層の増加に伴い, 900 nm以上の外部量子効率が増加していることもみてとれる. これらの長波長側の光吸収特性は量子ドット多積層構造によるものであるが, 900 nm付近のピークはInAsのウェットティングレイヤーの吸収であり, ドットによる吸収は1000 nm付近のピークである. これは量子ドットの全体積が少ないのと同時に, ドットによる光吸収で発生したキャリアが効率的に収集できていないことを示しており, 今後の課題である. 量子ドットを100層積層した太陽電池では, そのセル特性が極端に低下することが報告されている^{18,19)}. しかしながら本構造では, 150層積層した太陽電池でも良好な特性を示しており, InGaAs量子ドット太陽電池は超多積層化にすぐれた特性を有する.

図9は, 10~150層の量子ドット太陽電池と, GaAsレファレンスセルのI-V特性である. 測定はソーラーシミュレーターを用い, AM 1.5 G, $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 25°C において行った. それぞれのセルパラメーターを表1に記す. 図からわかるように, 短絡電流密度 J_{sc} が, 量子ドット層

表1 超多積層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット太陽電池のセルパラメーター.

QD layers	10	20	30	50	100	150	GaAs. ref.
Efficiency (%)	12.4	11.3	9.8	10.0	9.4	9.2	12.4
V_{oc} (V)	0.868	0.783	0.671	0.643	0.616	0.616	0.878
J_{sc} (mA/cm^2)	17.7	18.7	19.7	21.5	22.7	23.6	17.5
Fill factor	0.805	0.774	0.743	0.724	0.670	0.630	0.809

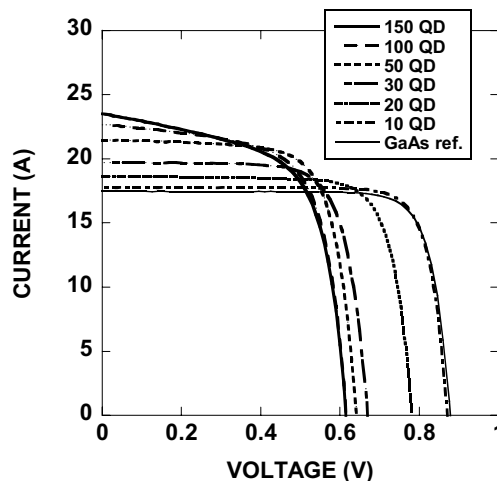


図9 超多積層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット太陽電池のI-V特性.

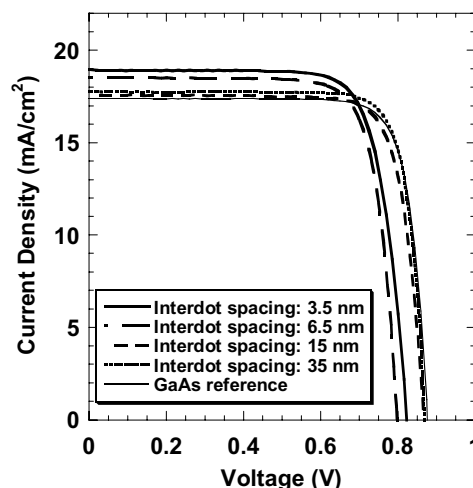


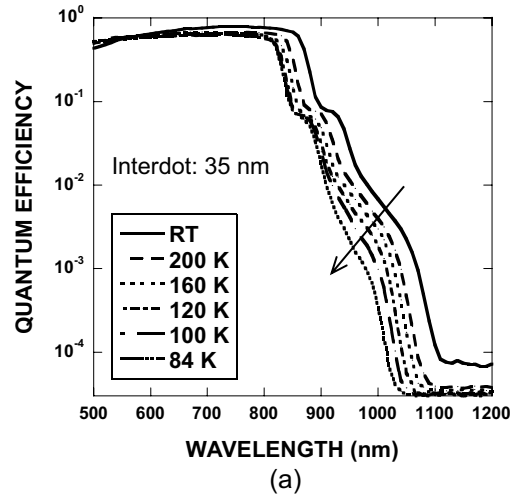
図10 10層積層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット超格子太陽電池のI-V特性.

数の増加に伴って増えている. これは図8で示したように, 外部量子効率が長波長側に増加したためと考えられる. 一方, 開放電圧 V_{oc} は, ドット層数が増加するに伴い減少している. これは前章でも述べたように, 量子ドット中で形成されたキャリアが収集されず再結合することに起因していると思われ, 結果として変換効率の低下を引き起こしている. この結果は現在報告されている量子ドット太陽電池共通の問題である.

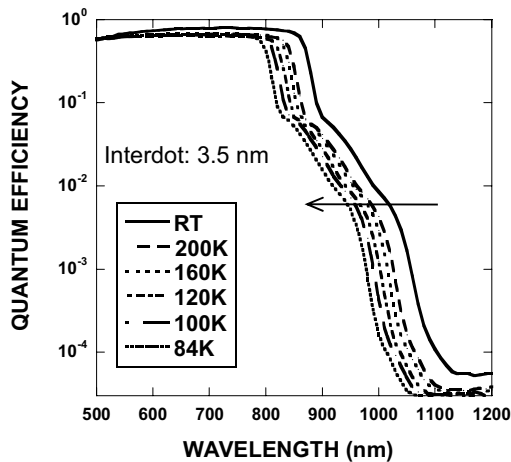
図10に, 10層の量子ドット太陽電池のドット間距離を

表2 10層積層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット超格子太陽電池のセルパラメーター.

Interdot spacing (nm)	35	15	6.5	3.5	GaAs ref.
Efficiency (%)	12.6	12.0	11.7	12.2	12.4
V_{oc} (V)	0.871	0.868	0.798	0.823	0.878
J_{sc} (mA/cm ²)	17.8	17.5	18.6	19.0	17.4
Fill factor	0.813	0.790	0.785	0.780	0.809



(a)



(b)

図11 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット超格子太陽電池の外部量子効率—温度依存性—.

35~3.5 nm と変化させたときの I-V 特性を示し、その各パラメーターを表2に示す。ドット間距離が 35 nm の素子では、わずかではあるが GaAs レファレンスセルを上回った。また、図からわかるように、ドット間距離を減少させても良好な I-V 特性を示している。ドット間距離が減少すると急激に素子特性が悪化することが報告されているが⁷⁾、InGaAs ドットの場合はそれほど観察されない。特に、ドット間距離が 3.5 nm とミニバンドが形成されている素子では、 J_{sc} が増加していることがみてとれる。これはミニバンド形成によるトンネル電流の増加によるものと

考えられ、それを確かめるために外部量子効率の温度依存性を測定した。図11(a)はドット間距離が 35 nm のもの、(b)は 3.5 nm のものである。それぞれ室温から 84K までの外部量子効率を示しており、1000 nm 付近のピークが量子ドットによる光吸収である。図11(a)からわかるように、35 nm の素子では量子ドットによる吸収が温度とともに低下していることがわかる。これは、量子ドットからのキャリアの取り出しメカニズムが熱エネルギーによることを示している。一方、ドット間距離が 3.5 nm のものでは、温度が低下してもドットによる吸収は変化していない。これはドットからのキャリアの取り出しが、熱エネルギーではなくトンネル効果によることを示している。したがって図10における J_{sc} の増加は、量子ドットミニバンドによるトンネル効果を、初めて太陽電池として確認したものと考えられる¹⁰⁾。

以上、量子ドット太陽電池の基本概念と、量子ドット超多積層構造および超格子の作製技術を中心に、量子ドット太陽電池のプロトタイプデバイスの簡単な紹介を行った。量子ドット太陽電池は理論的な変換効率が 60% 超を予測されているが、その研究はまだ始まったばかりであり、現在報告されている変換効率は 10 数% 程度である。問題点としては、中間バンド太陽電池で最も重要な二段階光吸収が、実際の量子ドット太陽電池で実証されていないことが挙げられる。すなわち、図2における E_{23} に相当する光吸収が、通常の太陽電池測定でみられていないことである。したがって量子ドットが逆にキャリアの再結合中心となってしまう、それが V_{oc} の低下に繋がっている。太陽光スペクトルのほかにさらに赤外光を照射することにより、二段階光吸収を観測した例も報告されたが²⁰⁾、今後はそれを通常の測定で観測することが重要である。また、In(Ga)As/GaAs 系量子ドットでは GaAs 基板のバンドギャップが小さく、 E_{23} に相当するエネルギーが小さいため、理想的な中間バンド太陽電池の形成が難しい。実際に量子ドット超格子が作製可能で、かつ理想的な中間バンドを形成できる材料系の探索とともに、二段階光吸収を利用した中間バンド太陽電池の動作実証もこれからであり、今後の研究展開が必須である。しかしながら、歪み補償技術

を用いなくても 400 層の量子ドット多積層構造が成長可能ということは誰も予想しなかったことであり、今後、さまざまな材料系で試みられる可能性がある。それにより量子ドット作製の材料バリエーションが広がり、理想的な 3 バンド形成可能な量子ドット系への新たな展開がひらける可能性がある。

本研究の一部は経済産業省のもと NEDO 技術開発機構から委託され、実施したものである。

文 献

- 1) S. Wojtczuk, P. Chiu, X. Zhang, D. Derkacs, C. Harris, D. Pulver and M. Timmons: "InGaP/GaAs/InGaAs 41% concentrator cells using bi-facial epigrowth," *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (Honolulu, 2010) pp. 1259-1264.
- 2) A. Yoshida, T. Agui, K. Nakaido, K. Murasawa, H. Juso, K. Sasaki and T. Takamoto: "Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction solar cells for concentrator application," *Technical Digest of 21st Int. Photovoltaic Science and Engineering Conference* (Fukuoka, 2011) 4B-40-01.
- 3) A. Luque and A. Marti: "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels," *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 5014-5017.
- 4) L. Marti, N. Lopez, E. Antolin, E. Canovas, A. Luque, C. Stanley, C. Farmer and P. Diaz: "Emitter degradation in quantum dot intermediate band solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 233510.
- 5) V. Popescu, G. Bester, M. C. Hanna, A. G. Norman and A. Zunger: "Theoretical and experimental examination of the intermediate-band concept for strain-balanced (In,Ga)As/Ga(As,P) quantum dot solar cells," *Phys. Rev. B*, **78** (2008) 205321.
- 6) S. M. Hubbard, C. D. Cress, C. G. Bailey, R. P. Raffaele, S. G. Bailey and D. M. Wilt: "Effect of strain compensation on quantum dot enhanced GaAs solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 123512.
- 7) Y. Okada, R. Oshima and A. Takata: "Characteristics of InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cell," *J. App. Phys.*, **106** (2009) 024306.
- 8) T. Sugaya, Y. Kamikawa, S. Furue, T. Amano, M. Mori and S. Niki: "Multi-stacked quantum dot solar cells fabricated by intermittent deposition of InGaAs," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95** (2011) 163-166.
- 9) T. Sugaya, S. Furue, H. Komaki, T. Amano, M. Mori, K. Komori, S. Niki, O. Numakami and Y. Okano: "Highly stacked and well-aligned In_{0.4}Ga_{0.6}As quantum dot solar cells with In_{0.2}Ga_{0.8}As cap layer," *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 183104.
- 10) T. Sugaya, O. Numakami, S. Furue, H. Komaki, T. Amano, K. Matsubara, Y. Okano, S. Niki: "Tunnel current through a miniband in InGaAs quantum dot superlattice solar cells," *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, **95** (2011) 2920-2923.
- 11) 岡田至崇, 八木修平, 大島隆治: "量子ドット超格子による高効率太陽電池の開発", *応用物理*, **79** (2010) 206-212.
- 12) T. Sugaya, T. Amano, M. Mori, S. Niki and M. Kondo: "Highly stacked and high quality quantum dots fabricated by intermittent deposition of InGaAs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49** (2010) 030211.
- 13) K. Akahane, N. Ohtani, Y. Okada and M. Kawabe: "Fabrication of ultra-high density InAs-stacked quantum dots by strain-controlled growth on InP(311)B substrate," *J. Cryst. Growth*, **245** (2002) 31-36.
- 14) D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. B. Chen, M. Kawaguchi, T. Kondo, E. Gouardes, F. Koyama and K. Iga: "Critical layer thickness of 1.2 μm highly strained GaInAs/GaAs quantum wells," *J. Cryst. Growth*, **221** (2000) 503-508.
- 15) T. Sugaya, T. Amano, M. Mori and S. Niki: "Highly stacked InGaAs quantum dot structures grown with two species of As," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28** (2010) C3C4-C3C8.
- 16) T. Sugaya, T. Amano and K. Komori: "Suppressed bimodal size distribution of InAs quantum dots grown with an As₂ source using molecular beam epitaxy," *J. Appl. Phys.* **104** (2008) 083106.
- 17) T. Sugaya, T. Amano, M. Mori and S. Niki: "Miniband formation in InGaAs quantum dot superlattice," *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 043112.
- 18) A. Takata, R. Oshima, Y. Shoji, K. Akahane and Y. Okada: "Fabrication of 100 layer-stacked InAs/GaNAs strain-compensated quantum dots on GaAs(001) for application to intermediate band solar cell," *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (Honolulu, 2010) pp. 1877-1880.
- 19) S. M. Hubbard, C. Plourde, C. Bailey, Z. Bittner, M. Harris, T. Bald, M. Bennett, D. Forbes and R. Raffaele: "InAs quantum dot enhancement of GaAs solar cells," *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (Honolulu, 2010) pp. 1217-1222.
- 20) Y. Okada, T. Morioka, K. Yoshida, R. Oshima, Y. Shoji, T. Inoue and T. Kita: "Increase in photocurrent by optical transitions via intermediate quantum states in direct-doped InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cell," *J. Appl. Phys.*, **109** (2011) 024301.

(2012 年 1 月 12 日受理)