

スマートスタック用InGaP/InGaAsP/GaAs 3接合トップセルの試作

菅谷武芳、大島隆治、長門優喜*、牧田紀久夫、太野垣 健、岡野 好伸*
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム
*東京都市大学

研究の目的 多接合太陽電池

★半導体直接接合技術
4, 5接合太陽電池

World records

- 46.6% : 集光 [2]
- 38.8% : 1 sun [3]
- GaAs上 2, 3接合 (Al)InGaP/(AlGaAs)/GaAs
- InP上 2接合 InGaAsP/InGaAs

Connected

ペーパースInGaP, InGaAsP

MOCVDで成長されている。
※特にInGaAsP系はMBEでは皆無。

3接合太陽電池
モノリシックエピタキシャル成長
InGaP/GaAs/InGaAs 3接合 Sharp [1]
37.9% : 1 sun
44.4% : 集光

スマートスタック多接合太陽電池

※AISTオリジナルの低コストで簡便な多接合技術 [4, 5]

断面図

- 接合抵抗 : < 1 Ωcm²
- 光吸収損失 : < ~ 2%

※スマートスタック技術による異種多接合太陽電池

1. InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs 4 接合太陽電池 ; η = 32.0% [6]
2. InGaP/GaAs//CIGS ; 世界初CIGS上3接合, η = 25.2% [7]
3. InGaP/GaAs//Si 3 接合太陽電池, η = 24.7% [8]

問題点: Si の E_g (1.1 eV) は最適 E_g (1.0 eV) に比べて大きく、電流がSiで律速される。
▶ トップを3接合にして電流整合を目指すとともに、Vocの向上が見込める。

実験

1. InGaAsP (1.65 eV) セカンドセルの作製

MBE成長のAlGaAsは特性が良くない。
※MBEによる1.65 eV帯In_{0.27}Ga_{0.73}As_{0.44}P_{0.56}の成長 [9]
世界的に先行例が無い。

In組成が高くなると相分離が起こり、均一成長が困難。

Growth Temp. 410°C, 430°C, 480°C, 570°C

2. InGaP/InGaAsP/GaAs トップセル

Front metal contact
480°C InGaP 1st 1.9 eV
430°C Tunneling layer
480°C InGaAsP 2nd 1.65 eV
570°C Tunneling layer
480°C GaAs 3rd 1.42 eV
Back metal contact

Carrier concentrations:
p⁺ - AlGaAs : 3.0 × 10¹⁹/cm³
n⁺ - InGaP : 1.5 × 10¹⁹/cm³

結果及び考察

1. InGaAsP薄膜のPL特性

1.65 eV (In_{0.27}Ga_{0.73}As_{0.44}P_{0.56})

PL INTENSITY (a.u.) vs WAVELENGTH (nm)

InGaAsP薄膜のPLスペクトル
P/As=4の時、1.65 eVの発光が得られた。

結果及び考察

2. InGaAsP (1.65 eV) セカンドセル

AM 1.5G, 25 °C, 100 mW/cm²

J-V curves of InGaAsP SCs : 温度依存性

Temperature (°C)	η (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF
410	9.292	0.983	12.121	0.798
430	8.893	1.002	11.981	0.807
450	3.587	0.713	8.600	0.582
AlGaAs	9.443	1.033	11.358	0.805

J-V curves of InGaAsP SCs : P/As比、In組成比温度依存性

P/As比	In比	η (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF
P/As=4	0.27	9.576	0.993	11.914	0.809
P/As=6	0.30	9.361	0.999	11.705	0.801
P/As=7	0.32	9.242	1.026	11.153	0.808

EQE spectra of InGaAsP SCs

Smaller E_g due to: Ga-P rich (In-As rich) (E_g 大) (E_g 小)

3. InGaP/InGaAsP/GaAs トップセル

J-V curves of 3J SCs

Structure	η (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF
InGaP/InGaAsP/GaAs	15.3	3.16	5.66	0.853
InGaP/AlGaAs/GaAs	12.6	3.05	5.28	0.780

★高 Voc : 3.16 V

Small J₀ : 光吸収層が薄いため

固体ソースMBEを用いた初めてのInGaP/InGaAsP/GaAsトップセルの方が特性良好

InGaAsPは3接合トップセルの2ndセルとして適している。

スマートスタック技術を用いることにより高効率な異種4接合、5接合太陽電池の作製が可能

4. XRDスペクトル

XRD GaAs sub.

★InGaAsP composition obtained from PL and XRD measurements

InGaAsP (In:0.27 μm/h, Ga:0.73 μm/h, P/As = 4)
In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.64}P_{0.36}
T_{sub}: 430°CでもIn原子の再蒸発 ※InGaPの場合は480°Cでも再蒸発無し。 [11, 12]

さらなる研究が必要

結論

1. 固体ソースMBEを用いて1.61~1.65 eV帯のInGaAsP薄膜の成長に初めて成功し、太陽電池の作製に応用した。
→変換効率が9.7%を記録: AlGaAsセルより特性が優れる。
2. In組成、P/As比の変化でInGaAsPのバンドギャップ制御が可能。
3. 高品質InGaP/InGaAsP/GaAs 3接合トップセルの作製に成功 (Voc:3.16 V)
→AlGaAsをセカンドセルに使用した3接合トップセルよりも高効率
4. InGaAsP成長時、In原子の再蒸発の可能性があり、今後のさらなる研究が必須である。
※InGaP/InGaAsP/GaAs 3接合太陽電池は、高効率スマートスタック多接合太陽電池のトップセルとして利用可能。

謝辞
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。

参考文献

- [1] T. Takamoto *et al.*, 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 2014, p.1 (2014).
- [2] F. Dimroth *et al.*, Prog. in Photovoltaics, **22**, 277 (2014).
- [3] P. T. Chiu *et al.*, IEEE J. Photovoltaics, **4**, 493 (2014).
- [4] H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Lett., **101**, 191111 (2012).
- [5] T. Sugaya *et al.*, J. Cryst. Growth, **425**, 322 (2015).
- [6] H. Mizuno *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 025001 (2016).
- [7] K. Makita *et al.*, Proc. 29th EUPVSEC 2014, p. 1427 (2014).
- [8] H. Mizuno *et al.*, Proc. 32nd EUPVSEC 2016, p. 73 (2016).
- [9] T. Sugaya *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **35**, 02B103 (2017).
- [10] T. Sugaya *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 08KE02 (2015).
- [11] T. Sugaya *et al.*, J. Cryst. Growth, **378**, 576 (2013).
- [12] T. Sugaya *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 05FV06 (2014).