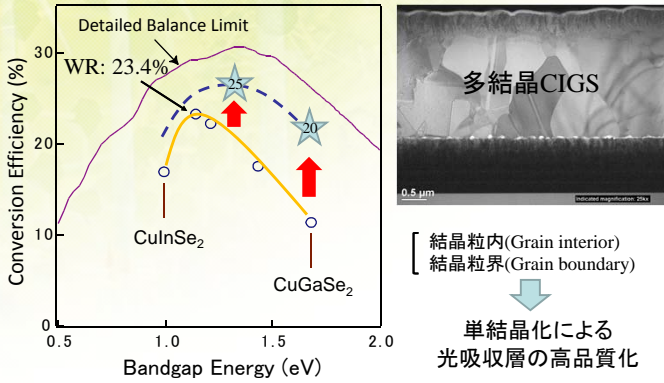


III-V族半導体基板上Epitaxial CIGS太陽電池の開発

西永 慈郎、石塚 尚吾、菅谷 武芳
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的



成膜・測定方法

CIGS solar cells

7. HCl etching
6. Cr-Ag Evaporation
5. Cleavage
4. DC magnetron sputtering
3. Chemical bath deposition
2. Molecular beam epitaxy
1. InGaSe (50 nm), $T_{sub}=520^\circ\text{C}$
8. Back contact and Mounting

Measurements

- Molecular beam epitaxy (Co-evaporation: Cu, In, Ga, Se)
- CGI: 0.3 / 0.7, CGI : 0.85, 0.95, 1.0
- InGaSe layer (50 nm), $T_{sub}=520^\circ\text{C}$
- NaF doping, KF-PDT ($T_{sub}=350^\circ\text{C}$)
- CdS/AZO/Al grid (Area: 0.25 cm²)
- Ion gauge, RHEED, SIMS, STEM
- J-V curves and C-V

Riber 32 MBE

実験結果 (MBE・三段階法、STEM、EDX)

MBE法による組成制御

$$\frac{J_i}{J_{Ga}} = \frac{P_i \eta_{Ga}}{P_{Ga} \eta_i} \sqrt{\frac{T_i M_{Ga}}{T_{Ga} M_i}}$$

$$\frac{\eta_i}{\eta_{N_2}} = \left(\frac{0.6 Z_i}{14} + 0.4 \right)$$

$BEP = BEP_{open} - BEP_{close} - BEP_{extra}$

P_i : Beam equivalent pressure (10^{-7} Torr)
 M_i : Relative molecular mass
 T_i : Absolute cell temperature
 η_i : ionization efficiency
 Z_i : number of electrons

- $T_{Ga} = 945^\circ\text{C}$, $P_{Ga} = 3.22 \times 10^{-7}$ Torr
- $T_{In} = 745^\circ\text{C}$, $P_{In} = 2.82 \times 10^{-7}$ Torr
- $T_{Cu} = 1180^\circ\text{C}$, $P_{Cu} = 1.33 \times 10^{-7}$ Torr

$GGI_{flux} = 0.7$
 $CGI = 0.80$ (CGI was measured by EPMA.)

三段階法による組成制御

Pyrometer

Stoichiometric point

1st stage: In, Ga, Se
2nd stage: Cu, Se
3rd stage: In, Ga, Se

1st stage: $(\text{In,Ga})_2\text{Se}_3$
2nd stage: $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2 + \text{Cu}_2\text{Se}$
3rd stage: $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2 + \text{Cu}(\text{In,Ga})_3\text{Se}_5$

ADF-STEM images showing ZnO, CIGS, and Mo/SLG layers.

実験結果 (STEM-EDX, SIMS, J-V curves, C-V)

ADF-STEM images for CGI: 1.0 and BF-STEM images for CGI: 1.0.

Model: Band structure

E_C vs E_V for p-CuIn_{0.3}Ga_{0.7}Se₂ / p-GaAs. Bandgap is 1.5 eV.

Concentrations (cm⁻³) vs Depth (μm) for Na and K in CIGS (CGI: 0.85) and CIGS (CGI: 1.0).

Current (mA/cm²) vs Voltage (V) for Poly-crystal CIGS and Single-crystal CIGS.

N_{Cu} (cm⁻³) vs x (μm) for Poly-CIGS, CGI: 0.95, CGI: 0.85, and 0 V bias.

	Eff. (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	$R_{sh, dark}$ (Ωcm^2)	$R_{ser, dark}$ (Ωcm^2)	$N_{Cu, 0V}$ (cm ⁻³)	$J_{0, dark}$ (mA/cm ²)	n_{dark}
CGI: 0.85	20.9	0.767	34.5	0.789	1×10^5	0.08	2×10^{16}	4×10^{-9}	1.3
CGI: 0.95	16.7	0.737	33.2	0.683	26000	0.5	6×10^{16}	1×10^{-8}	1.7
Poly-CIGS	22.1	0.786	35.1	0.800	5700	0.34	7×10^{16}	3×10^{-9}	1.3

結論・謝辞

➤ CIGSエピタキシャル成長

- ・ MBE法によりCIGSエピタキシャル成長に成功
- ・ Cu poorの場合、CIGS/GaAs界面反応を抑制
- ・ MBE法と三段階法の相違点を検証した

➤ 太陽電池特性、今後の課題

- ・ Ga濃度勾配、HLSによって変換効率20.9%を達成
- ・ 構造最適化、ドーピング等により高効率化を狙う

謝辞: 本研究は経済産業省「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」により実施されたものである。関係各位に感謝致します。

参考文献

1. S. Niki, H. Shibata, P. J. Fons, A. Yamada, A. Obara, Y. Makita, T. Kurafuji, S. Chichibu, H. Nakanishi, Appl. Phys. Lett. **67**, 1289 (1995).
2. M. Fujita, A. Kawaharazuka, Y. Horikoshi, J. Cryst. Growth **378**, 154 (2013).
3. K. Abderrafi, R. Ribeiro-Andrade, N. Nicora, M. F. Cerqueira, M. G. Debs, H. Limborço, P. M. P. Salomé, J. C. Gonzalez, F. Briones, J. M. Garcia, S. Sadewasser, J. Cryst. Growth **475**, 300 (2017).
4. S. Siebentritt, N. Papathanasiou, J. Albert, and M. Ch. Lux-Steiner, Appl. Phys. Lett. **88**, 151919 (2006).
5. J. Nishinaga, T. Nagai, T. Sugaya, H. Shibata, S. Niki, Appl. Phys. Express **11**, 082302 (2018).
6. J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Takahashi, M. Iioka, H. Higuchi, Y. Ueno, H. Shibata, S. Niki, Appl. Phys. Express **10**, 092301 (2017).