

CIGS太陽電池のERE (外部発光量子効率) と開放電圧の関係

柴田肇¹、西永慈郎¹、上川由紀子¹、鯉田崇¹、永井武彦¹、反保衆志¹、石塚尚吾¹、山口真史²

1 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、2 豊田工業大学

研究の目的

外部発光量子効率(ERE)は、次式で定義される。

$$ERE = \frac{\text{単位時間あたりの発光光子数 (photons/s)}}{\text{単位時間あたりに注入された電子数 (electrons/s)}} \quad (1)$$

V_{OC} の放射限界値($V_{OC,rad}$)とEREの間には、次式の関係が成立する。

$$V_{OC,rad} = V_{OC} - \left(\frac{k_B T}{q}\right) \ln ERE \quad (2)$$

但しここで(2)式の右辺のEREは、デバイスへの注入電流が I_{SC} であるときの値である。

$V_{OC,rad}$ の値は V_{OC} の理論限界値であり、デバイス開発の重要な指針の一つである。

本研究の目的は、産総研で作製されたCIGS太陽電池の V_{OC} とEREの値を測定し、 $V_{OC,rad}$ の値を評価することである。

実験

EREの測定には、ATTO社製のERE測定装置 WSL-2000 SCREMSを用いた。

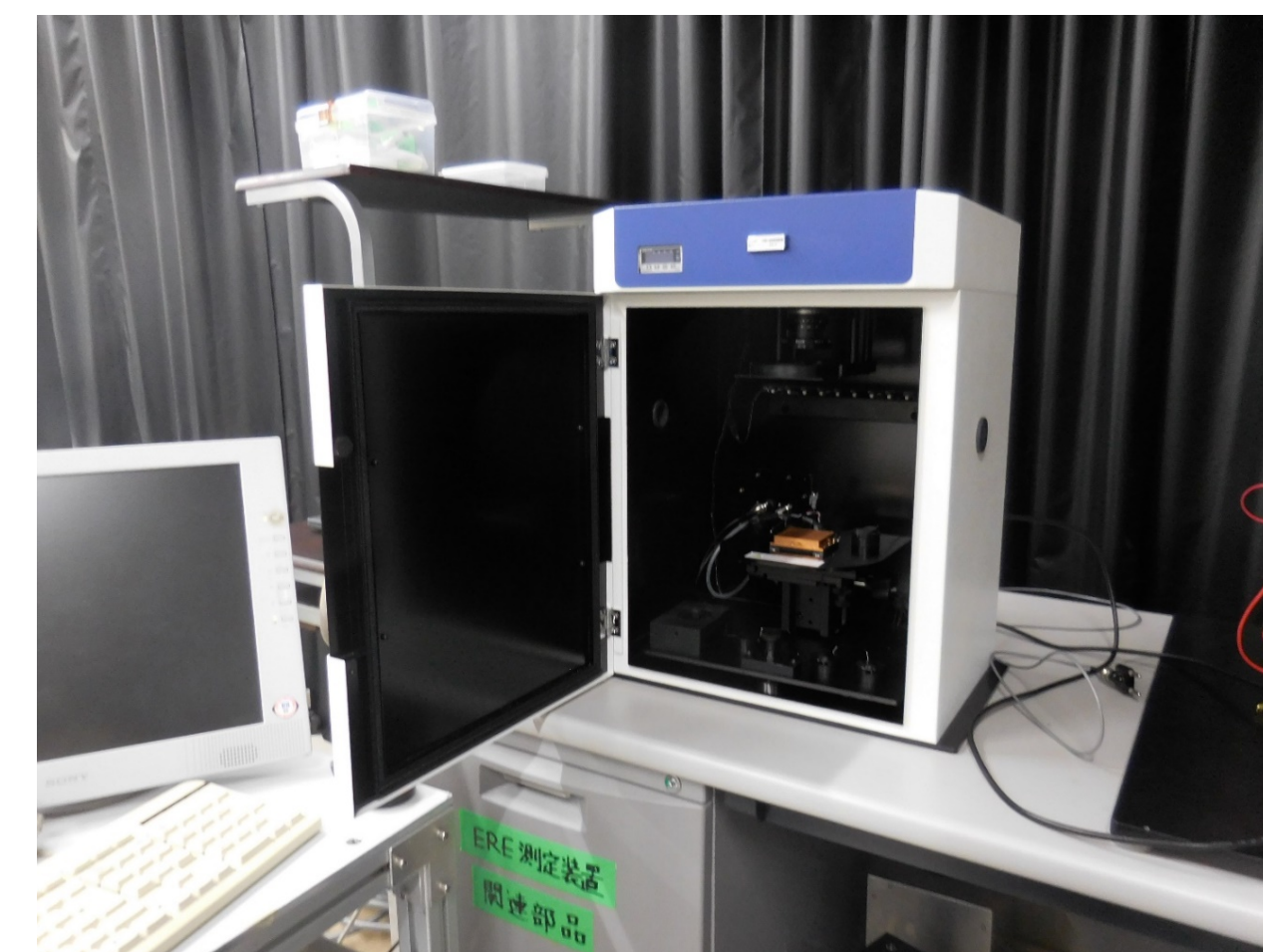


図1 WSL-2000 SCREMSの全体像

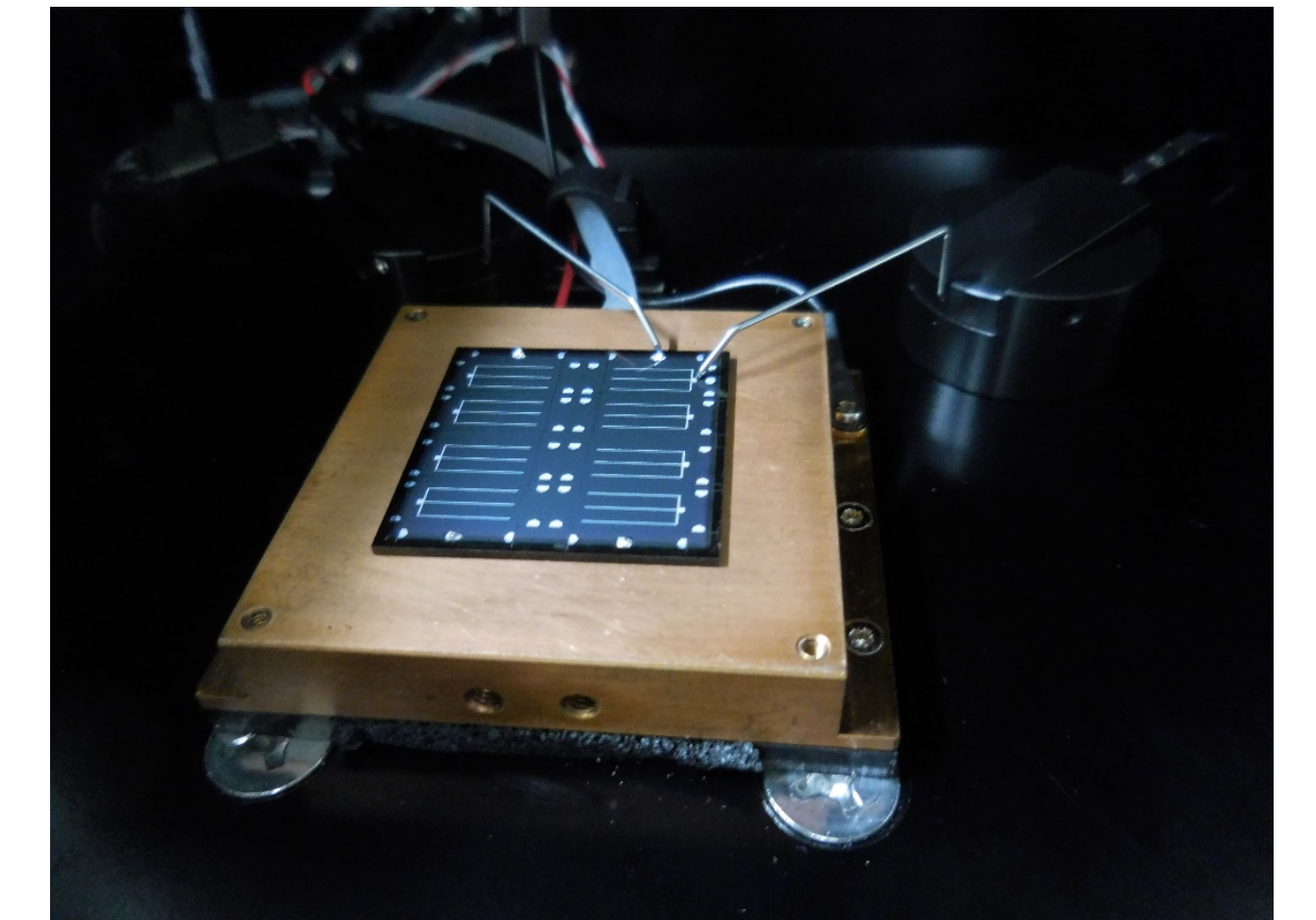


図2 試料付近の拡大図

結果と考察1

実際にEREを測定する方法は、以下ようになる。

- ①セルに電流 I を流す。
- ②セルのエレクトロルミネッセンス(EL)画像を、適当な露光時間で撮影する。
- ③得られたEL画像から、セル全体の発光強度を算出する。
- ④得られた発光強度と露光時間から、単位時間あたりの発光光子数 N を算出する。
- ⑤EREの値を、 $ERE = N/qI$ により算出する(q は電気素量である)。

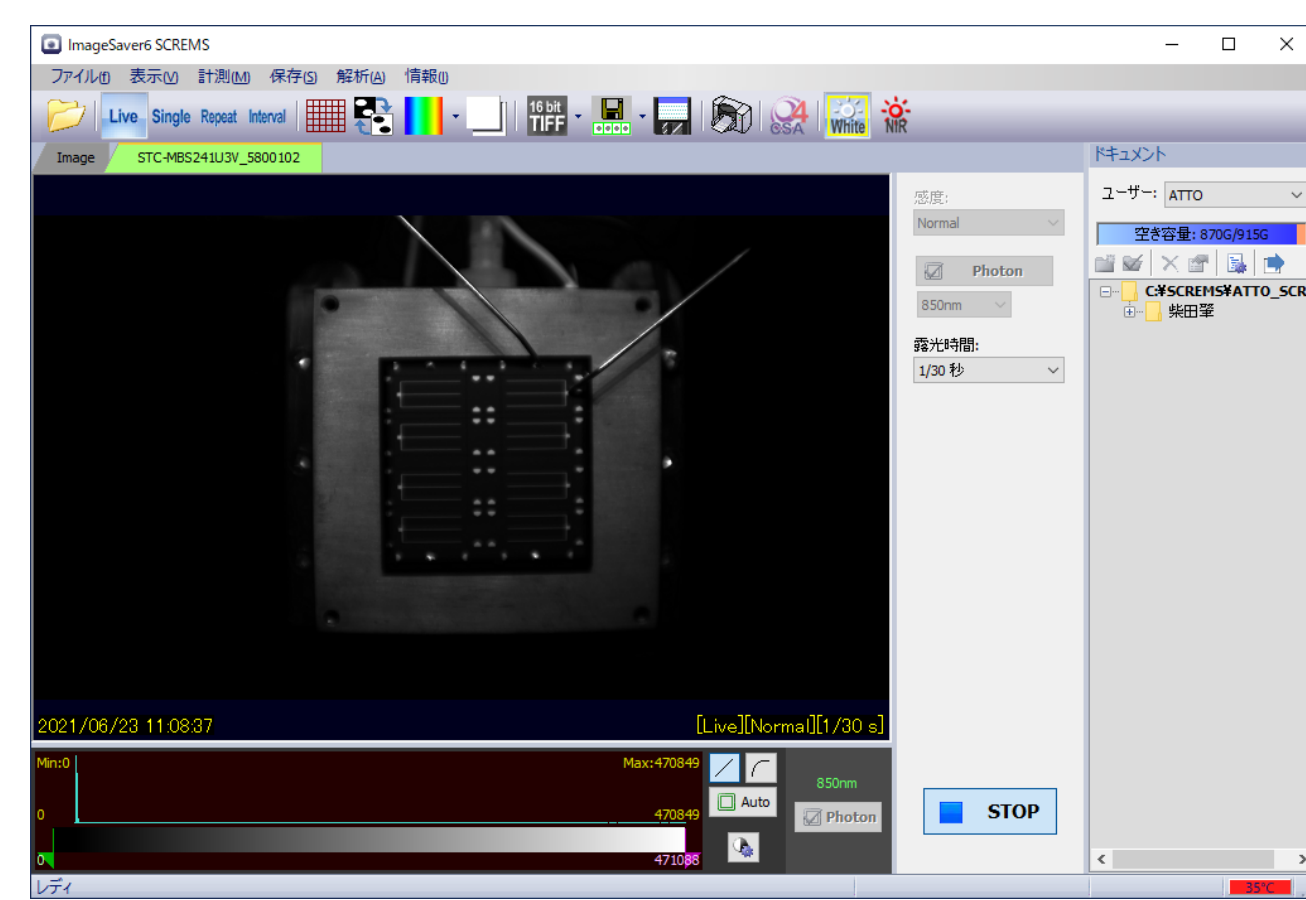


図3 装置に内蔵されている白色光源で照明されたときの画像

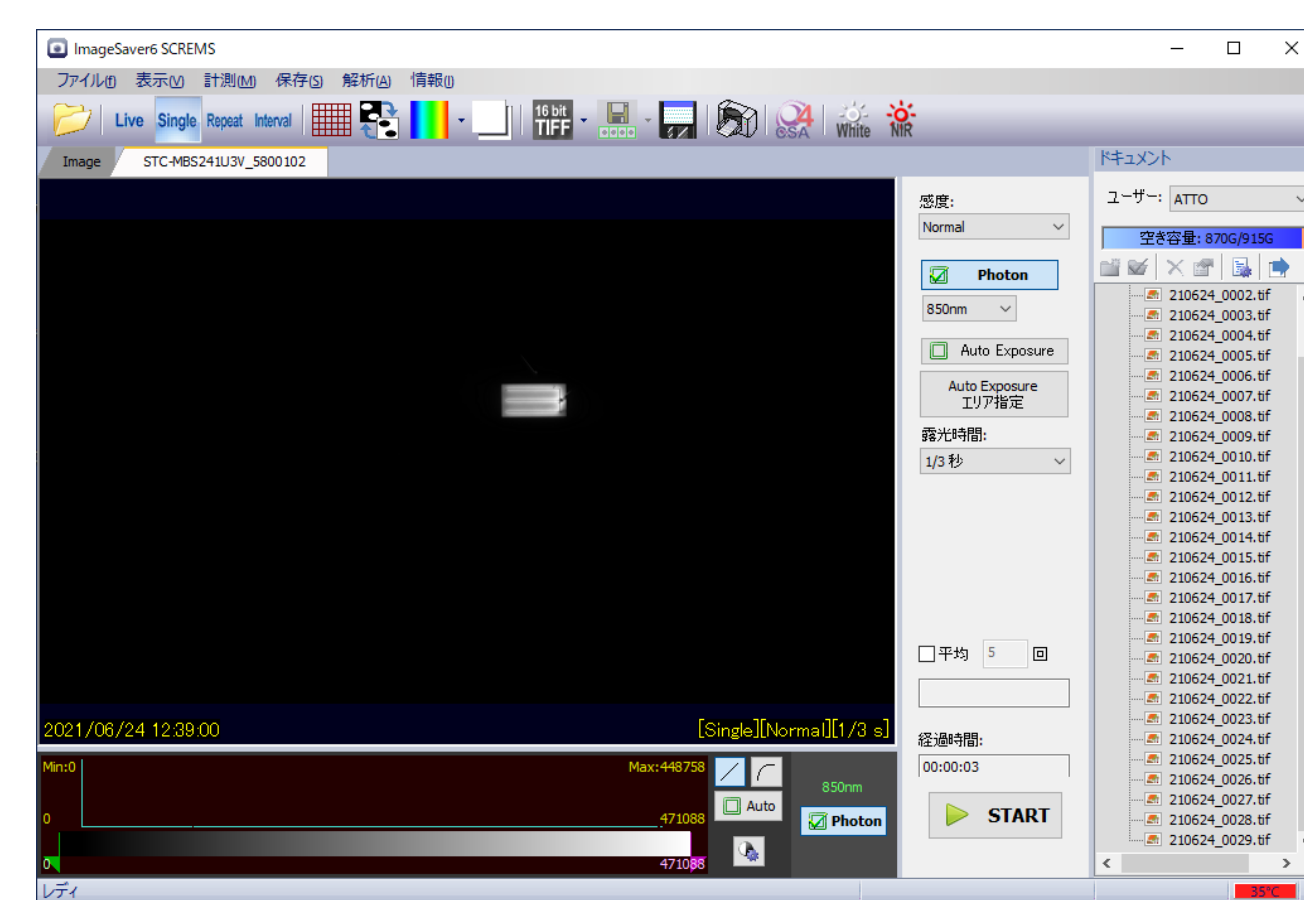


図4 撮影されたEL画像の例 (I = 40 mA、露光時間 = 1/3 sec)

図2に示された8個のセルについて、EREの値の I 依存性を求めた結果を図5に示す。図5を見ると、 I の値が増大するに従ってEREの値も単調に増大することが分かる。

後述する表1に示すように、これらのセルの I_{SC} は約18 mAであるため、図5の結果から $I = 20$ mAのEREの値を抜粋した結果を図6に示す。

図6を見ると、これらのセルのEREの値は、およそ $ERE \approx 0.4\%$ であることが分かる。

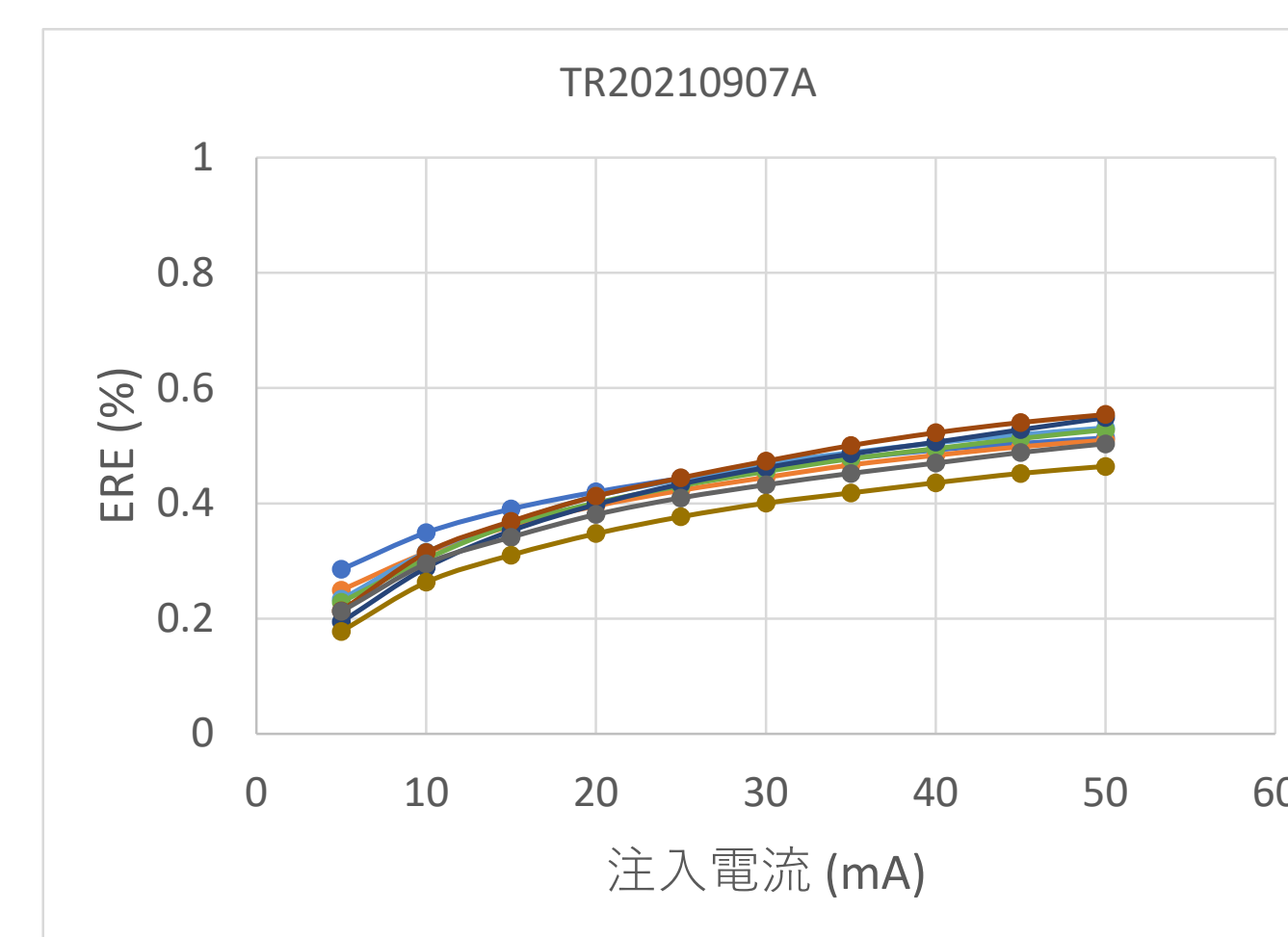


図5 EREの値の I 依存性

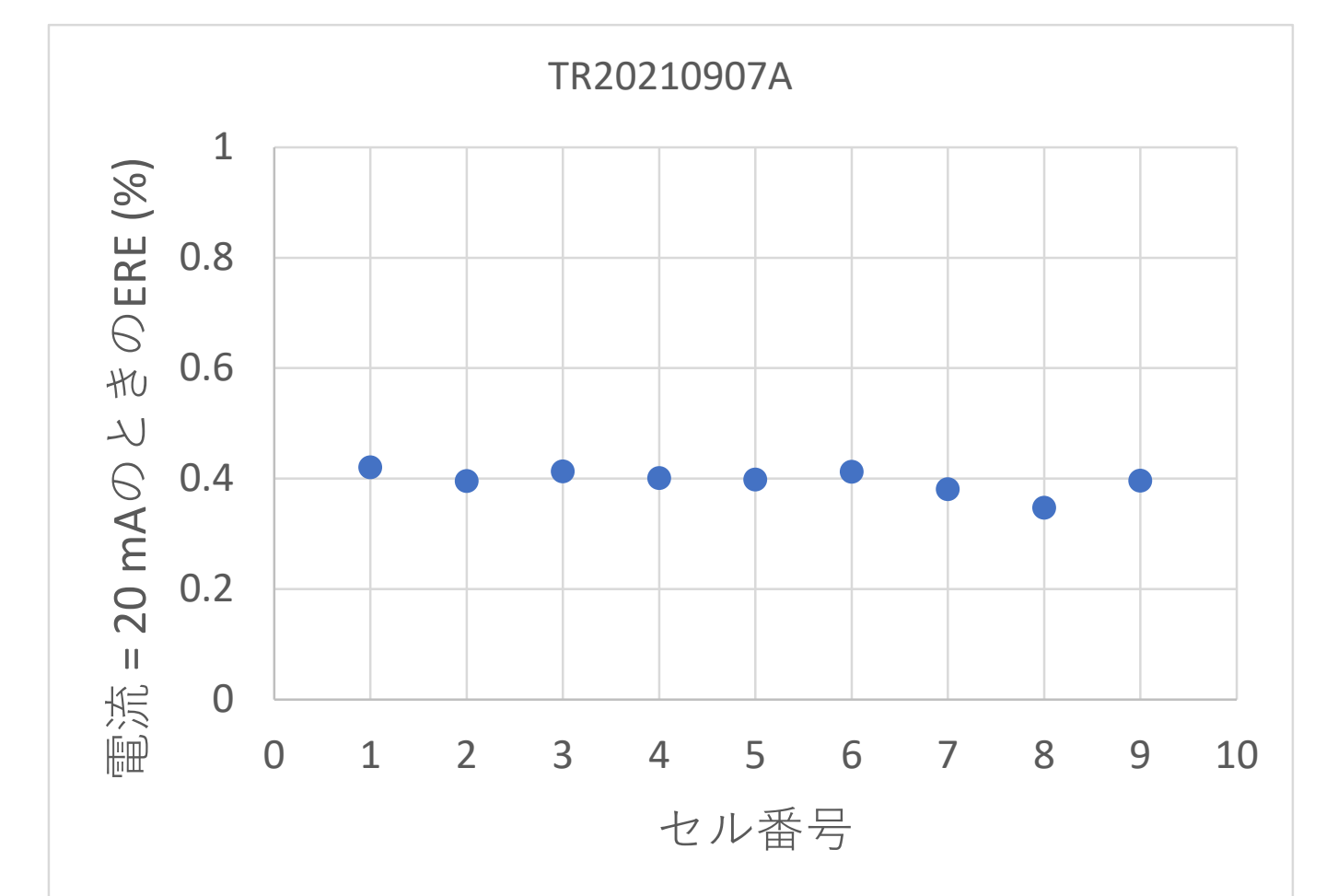


図6 $I = 20$ mAのEREの値

結果と考察2

図2に示された8個のセルの $J-V$ 特性(平均値)を、図7に示す。

また得られた結果からデバイス・パラメータの値を求めた結果を、表1に示す。

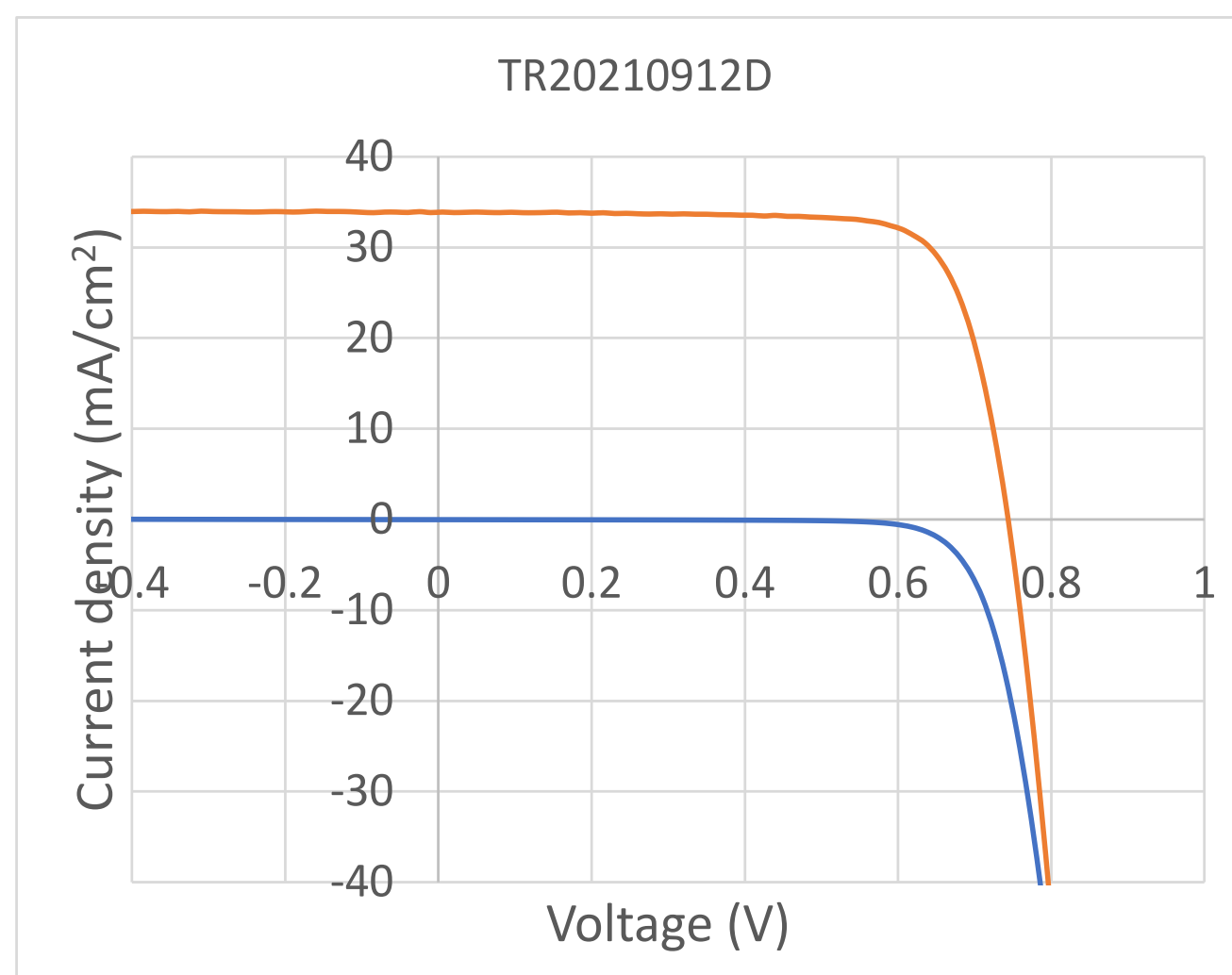


図7 セルの $J-V$ 特性(平均値)

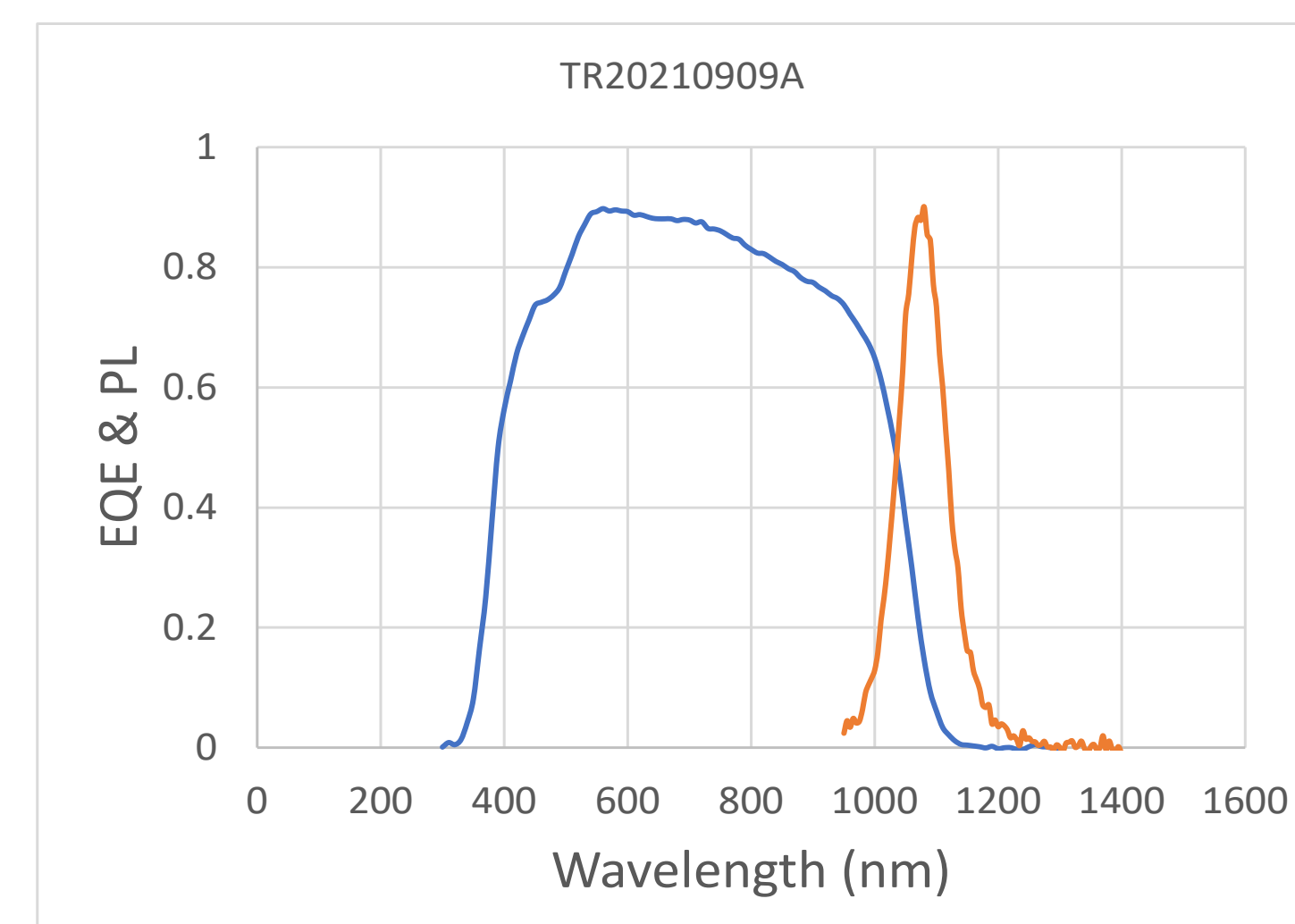


図8 セルのEQEスペクトル(平均値)とPLスペクトル

表1 デバイス・パラメータ

パラメータ	変換効率 (%)	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF
数値	19.5	0.74	17.7	33.9	0.77

図2に示された8個のセルのEQEスペクトル(平均値)を、PLスペクトルと一緒に図8に示す。

PL発光の発光メカニズムは、バンド端発光であると考えられる。従って本研究で測定したEL発光の発光メカニズムも、バンド端発光であると考えられる。

また $E_g = 1.16$ eV であることが、EQEスペクトルから分かる。

図6で得られた $ERE = 0.4\%$ という値と表1の $V_{OC} = 0.74$ V という値を(2)式に代入して $V_{OC,rad}$ の値を求めると、 $V_{OC,rad} \approx 0.89$ V という値を得る。

結論

図9に示す結果を、最終的に得た。従って、このセルの V_{OC} の本質的な損失量は、 $V_{OC,nrad} \approx 0.15$ V であることが分かる。

なお図5において I の値が増大するに従ってEREの値も単調に増大する理由としては、注入電流が増大するに従って非輻射性再結合が抑制されることが考えられる。

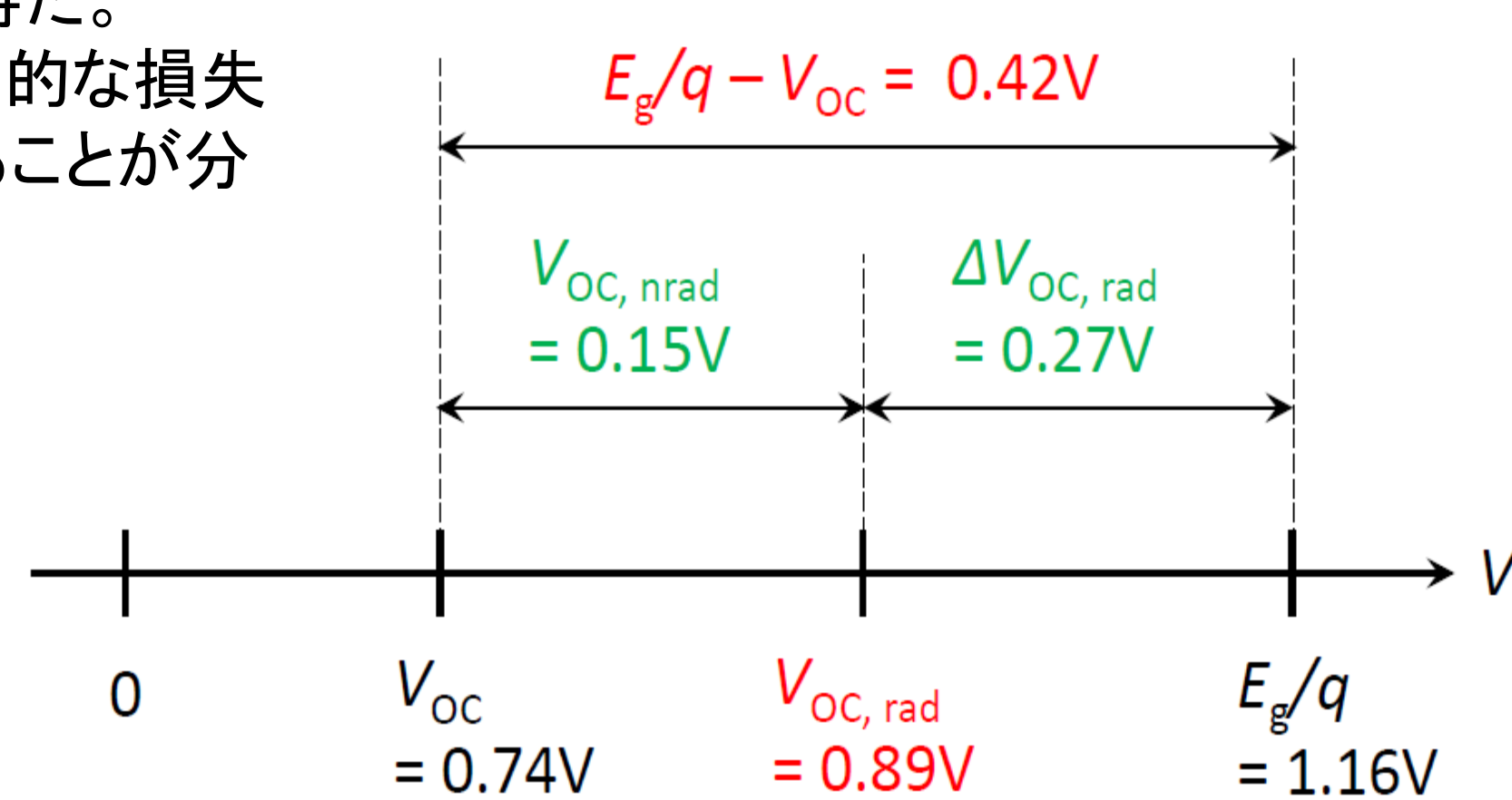


図9 セルの V_{OC} と $V_{OC,rad}$ の関係

参考文献

- U. Rau and J. H. Werner, Appl. Phys. Lett., 84, 3735 (2004).
- U. Rau, Phys. Rev. B, 76, 085303 (2007).
- U. Rau et al., Phys. Rev. Appl. 7, 044016 (2017).
- T. Kirchartz and U. Rau, J. Appl. Phys. 102, 104510 (2007).
- T. Kirchartz et al., Thin Solid Films 515, 6238 (2007).
- T. Kirchartz and U. Rau, Phys. Stat. Solidi(a) 205, 2737 (2008).
- T. Kirchartz et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 92, 1621 (2008).
- T. Kirchartz et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. 17, 394 (2009).
- M. Green, Prog. Photovoltaics 20, 472 (2012).
- M. Green and A. Ho-Baillie, ACS Energy Lett. 4, 1639 (2019).
- M. Yamaguchi et al., J. Mater. Res., 32, 3445 (2017).
- M. Yamaguchi et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. 26, 543 (2018).
- M. Yamaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FS03 (2018).
- M. Yamaguchi et al., DOI:10.1557/s43578-021-00440-x