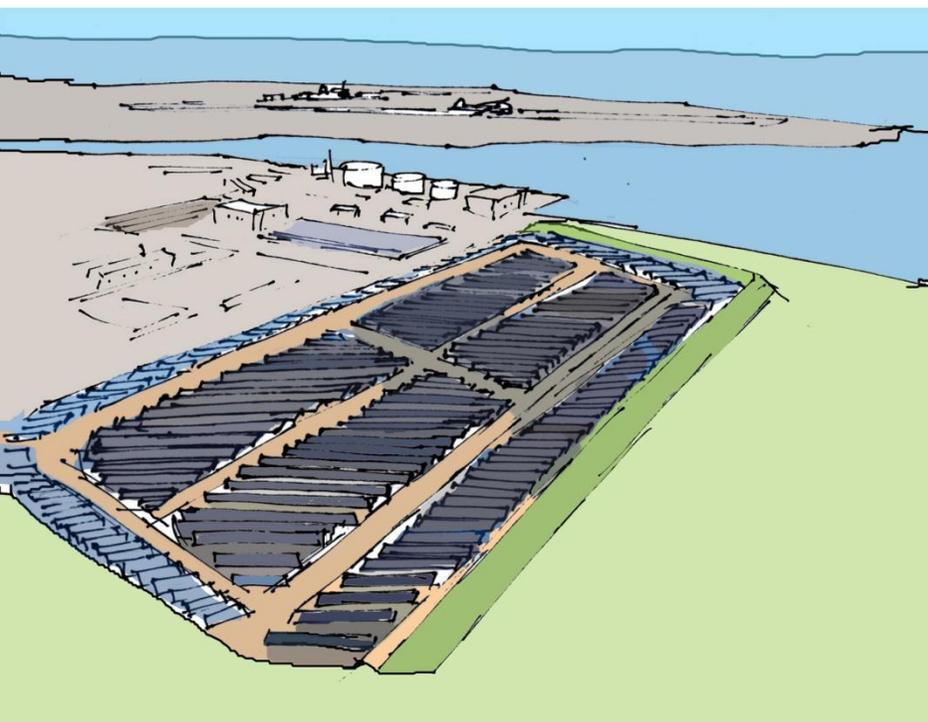


第136回結晶工学研究会
2012年4月20日



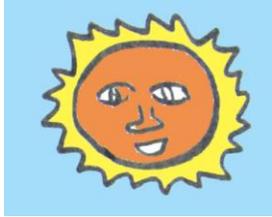
化合物太陽電池の ポテンシャルと課題



佐藤勝昭
科学技術振興機構



独立行政法人
科学技術振興機構



はじめに

- 現在実用されている太陽電池のうち最も高い変換効率を示すのはIII-V族単結晶系多接合太陽電池で、集光型で42%に達します。
- III-V族単結晶系は高効率ですが、高コストのため宇宙用やソーラーカーレース用としてのみ使われています。低コスト化をめざし多結晶系の研究が進んでいますが高効率化、大面積化には課題があります。
- 化合物多結晶薄膜系は、安価な基板とシンプルなプロセスによって低コスト化が図られ、すでにCdTe、CIGS系が量産体制にはいり、普及が進んでいます。しかし、両者とも理論限界変換効率には達しておらず、高効率化のポテンシャルがありながら課題もたくさんあります。
- ここでは、化合物系太陽電池を結晶工学の観点から俯瞰し、今後の研究開発の方向性を示したいと思います。



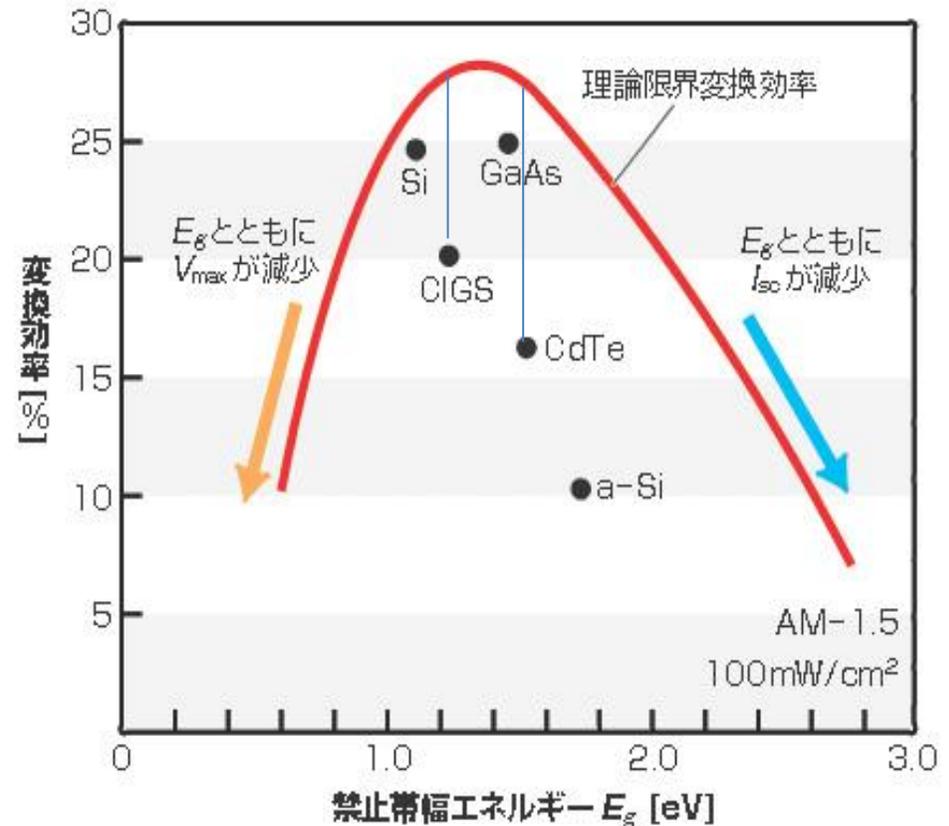
化合物太陽電池のふしぎ

- Si太陽電池ではバルク多結晶(multicrystalline)が使われているのに、GaAsのバルク多結晶太陽電池がないのはなぜ？
- CIGS太陽電池では多結晶(polycrystalline)薄膜で高効率が出てきているのに、GaAs多結晶薄膜では効率が出ないのはなぜ？
- CIGSは、バルク単結晶では効率がでない。多結晶薄膜のほうが高効率なのはなぜ？
- セルでは効率が高くても、モジュールではかなり低い。効率を制限しているのは何？



理論限界変換効率と化合物半導体

- 図は、理論的に予測できる単接合太陽電池の最大の変換効率(25°C)をバンドギャップ E_g の関数として表した曲線で、「理論限界変換効率曲線」と呼ばれます。●は各材料で実現している最高値です。
- 図を見ると、CIGSもCdTeも本来のポテンシャルを発揮していないことがわかります。



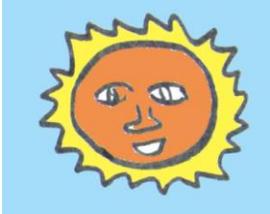
太陽電池の理論限界変換効率のバンドギャップ依存性



表1. 1.0~1.7eVの間の バンドギャップをもつ半導体

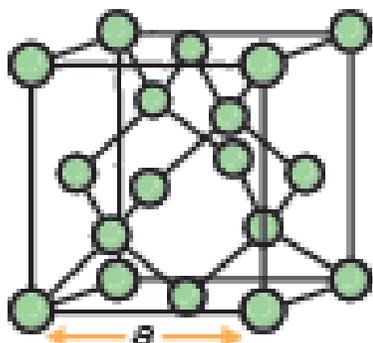
半導体名	Eg (eV)	直接/間接	結晶構造	半導体名	Eg (eV)	直接/間接	結晶構造
CuInSe₂	1.04	直接	CH	GaAs	1.42	直接	ZB
Si	1.12	間接	D	CdTe	1.47	直接	ZB
ZnGeAs ₂	1.15	直接	CH	CuInS ₂	1.53	直接	CH
AgGaTe ₂	1.15	直接	CH	CdSiAs ₂	1.55	直接	CH
CdSnP ₂	1.17	直接	CH	AlSb	1.62	間接	ZB
CuGaTe ₂	1.23	直接	CH	CuGaSe₂	1.68	直接	CH
AgInSe ₂	1.24	直接	CH	CdGeP ₂	1.72	直接	CH
InP	1.34	直接	ZB	a-Si:H	1.7	—	非晶質

D:ダイヤモンド構造、ZB:閃亜鉛鉱構造、CH:カルコパイライト構造



結晶構造

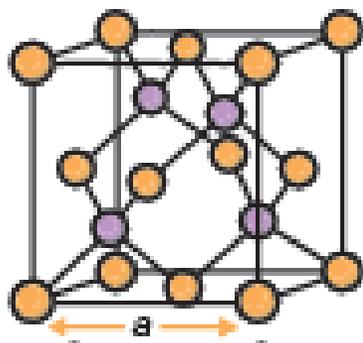
a シリコン



● Si
格子定数 $a = 5.431 \text{ \AA}$

ダイヤモンド構造

b ヒ化ガリウム

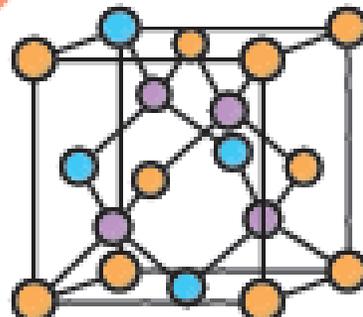


● Ga ● As
格子定数 $a = 5.653 \text{ \AA}$

閃亜鉛鉱構造 (ZB)

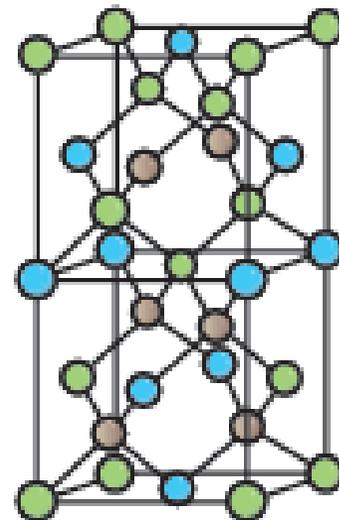
c

ヒ化ガリウムインジウムアロイ (混晶)



● Ga ● In ● As

セレン化銅インジウム



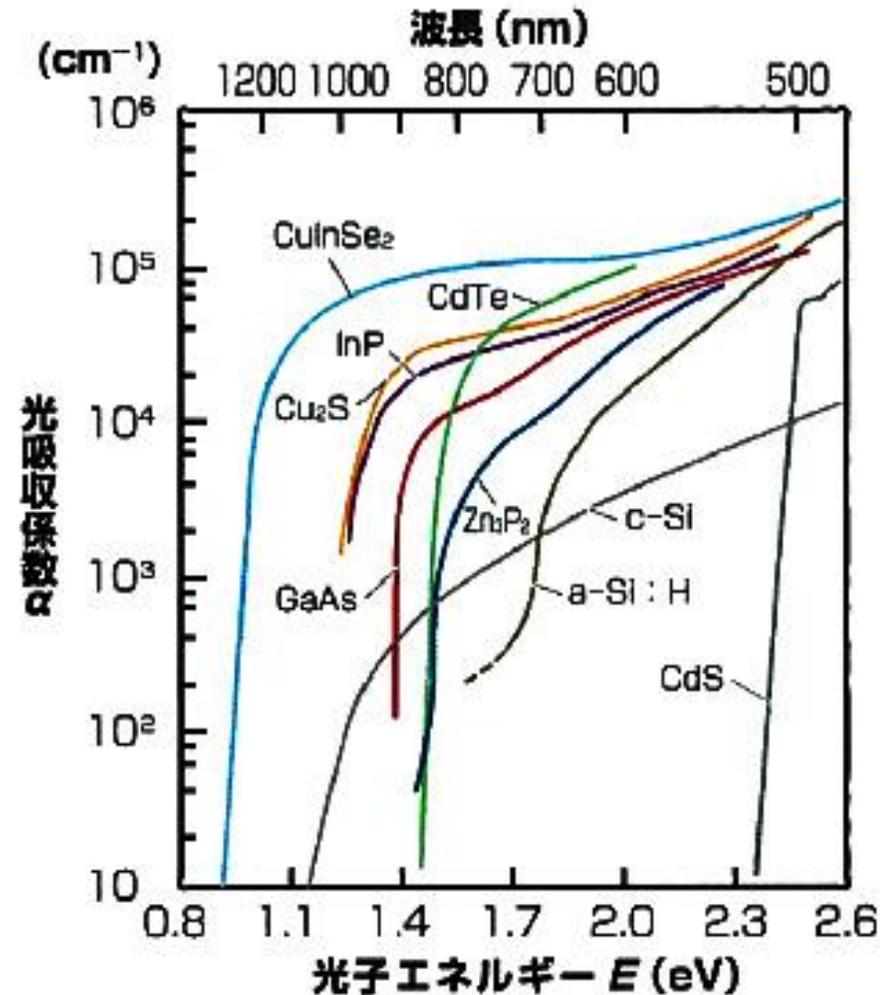
● Cu ● In ● Se

カルコパイライト構造 (CH)



主な半導体の光吸収スペクトルの比較

- 結晶シリコン(c-Si)は間接遷移型吸収端をもつため光吸収係数が小さいのに対し、直接吸収端をもつ GaAs, CdTe, CIS(CuInSe_2) などの化合物半導体は Si より2桁近く大きな吸収係数を示します。
- 特に CIS は近赤外域の吸収が強いが特徴です。





化合物系太陽電池のパフォーマンス

- 3種類(III-V族、CIGS系、CdTe系)の化合物系太陽電池のモジュールとセルにおける変換効率のチャンピオンデータをます。
- CdTeもCIGSもセルの効率は高いのに、モジュール効率になると10%そこそこしかありません。化合物がもつ高いポテンシャルを生かし切れていないのです。
- このギャップを埋めるには、結晶工学的アプローチが必要です。

表. 化合物太陽電池の比較

小分類	現状の変換効率(%)**		モジュールコスト***	資源	特徴
	モジュール	セル			
III-V族	36.1	41.6		△	超高効率。宇宙用。高コスト、資源問題に難
CIGS系	13.6	20.0	(0.99)&	○	低コストで大面積可能。省資源。大面積効率に難
CdTe系	10.9	16.7	0.98+	△	低コスト、大量生産。中効率。Cd使用が問題

& 2008年：Nanosolar 社の発表 (role-to-role)

+ 2009年：First Solar 社発表# Estimation: Joseph Kalowekamo, Erin Baker : Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells; Solar Energy 83, 1224-1231 (2009)

** M.A.Green et al. :Solar cell efficiency tables (version 35); Progress in Photovoltaic Research Application, vol.18 (2010) pp.144-150.

*** ピークパワー1Wあたりのモジュールコストを米ドルで表したものの



III-V 族太陽電池

III-V 族化合物系太陽電池の変換効率のチャンピオンデータ

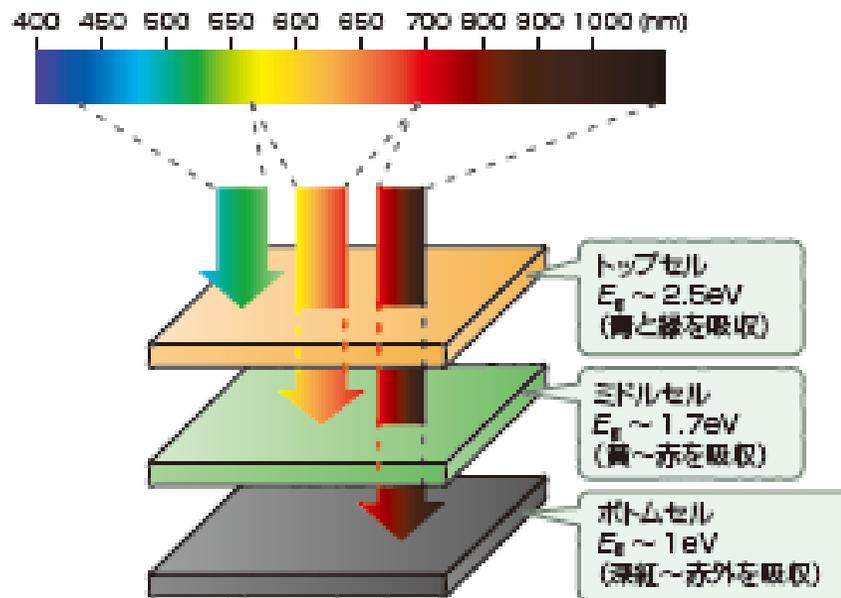
材料	非集光/集光	接合数	端子数	変換効率(%)	発表者、発表年
GaAs (薄膜)	非集光	単接合	2	26.1	Radboud U.2009
GaAs	集光 (232sun)	単接合	2	28.8	Fraunhofer,2009
GaAs (多結晶) /Ge基板	非集光	単接合	2	18.4	RTI,1997
InP (エピ薄膜)	非集光	単接合	2	22.1	Spire,1990
GaInP/GaAs	非集光	2接合	2	30.3	Japan Energy,1996
GaInP/GaAs/Ge	非集光	3接合	2	32.0	Spectrolab.,2003
GaAs/CIS	非集光	2接合	2	25.8	Kopin/Boeing,1988
GaInP/GaAs/Ge	集光 (364sun)	3接合	2	41.6	Spectrolab.,2009

出典：M.A.Green et al. : Solar cell efficiency table(version 35), Prog. Photovolt : Res. Appl. 18 (2010) 144-50



タンデムセルとは？

- トップセルで青から緑を吸収し、ミドルセルで黄から赤を吸収し、残りの深紅から赤外光をボトムセルで吸収することで、太陽光のスペクトルを有効利用します。
- しかし、3つのセルを積層しても、3つの太陽電池それぞれの最大出力を合わせた出力を得ることはできません。
 - なぜなら、2番目、3番目のセルには、上のセルで吸収された光が届かないこと
 - 直列につなぐので電圧は足し算になりますが、電流はもっとも電流密度 (I_{sc}) の小さなセルで抑えられてしまうということ
 - プロセス上、上に載せたセルの結晶性が悪くなり、性能が発揮できないということもあります。

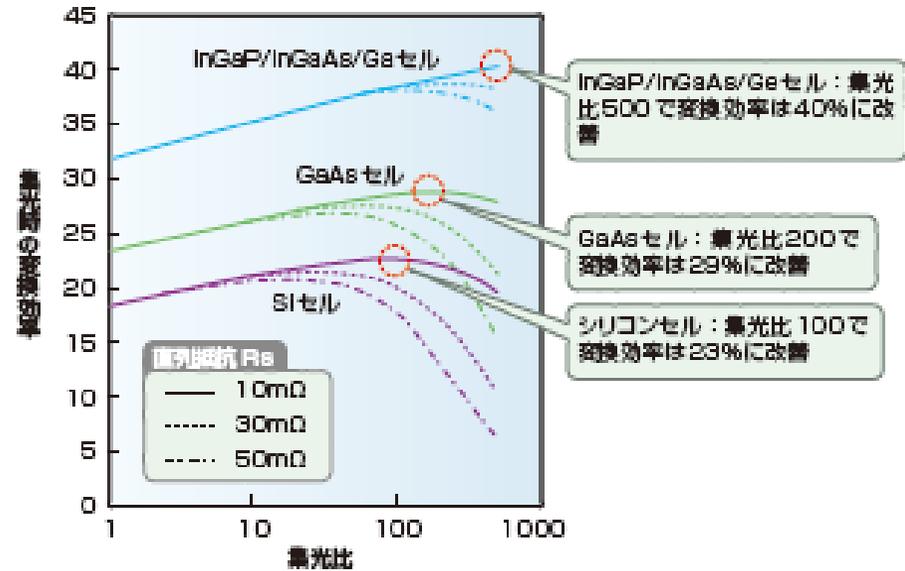
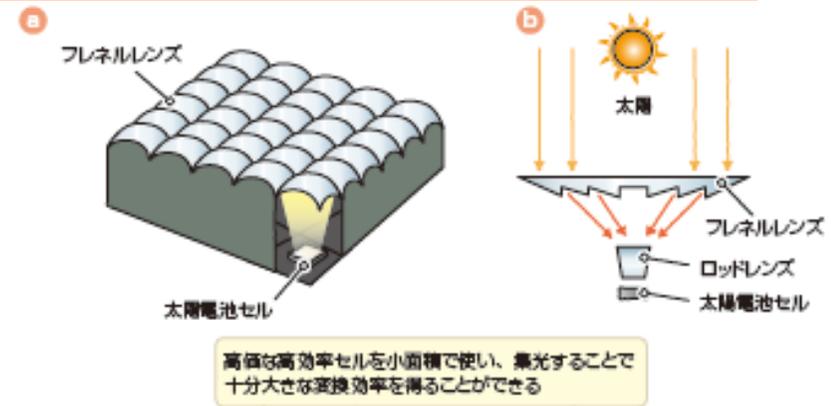


3接合型タンデム 太陽電池の概念図



集光型とは？

- 宇宙用に開発された複雑な構造のセルは、効率が高くて高コストなので、大面積の太陽電池モジュールとしては用いられません。しかし、安価なレンズや鏡で集光すれば小面積のセルでも十分な電力をつくれるので、宇宙用のセルを地上用に転用することができます。上の図は、フレネルレンズ集光型太陽電池を模式的に示したものです。
- 集光した場合、短絡電流密度は集光比に比例して増大し、開放電圧は集光比の対数に比例して増加します。また、集光すると開放電圧が増大するために曲線因子が改善され、変換効率が多少よくなるという効果もあります。ただし、直列抵抗が高いと改善の効果は下がります。

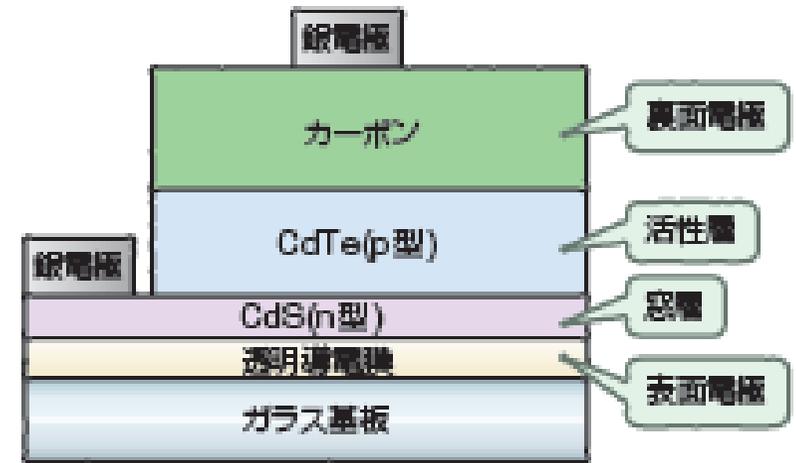


集光比を上げると、変換効率ははじめは増加するが、ある集光比で最大値をとったあとは減少する。直列抵抗が低いほど変換効率の最大値は大きくなる

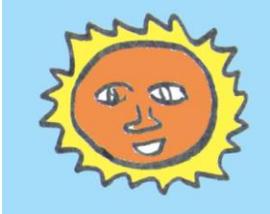


化合物系多結晶太陽電池の構造と 薄膜形成プロセス(1) CdTe

- 図は、CdS/CdTe太陽電池の構成図です。
- 透明導電膜をつけたガラス基板にn-CdSの薄膜を堆積したものを基板として、近接昇華法でCdTeを堆積し、カーボンを裏面電極として塗布するという、大量生産に向きわめてシンプルなプロセスで作製します。
- CdTeペーストを塗布・乾燥することによりCdTe乾燥膜を形成したガラス基板と、CdS膜を成膜したガラス基板とを、CdTe乾燥膜とCdS膜が相対する向きに向かい合わせて密着させて熱処理する方法も報告されています。

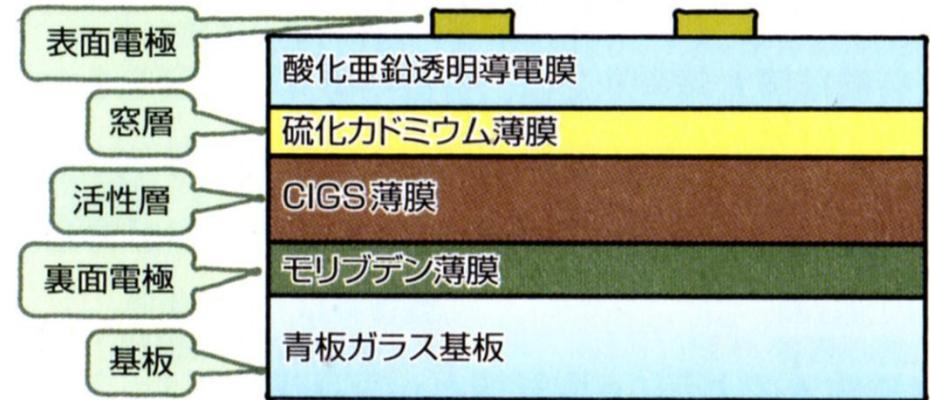


太陽光はガラス基板から入射する



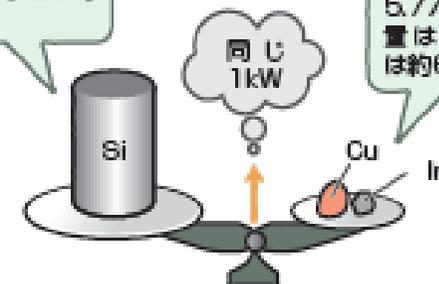
化合物系多結晶太陽電池の構造と 薄膜形成プロセス(2)CIGS

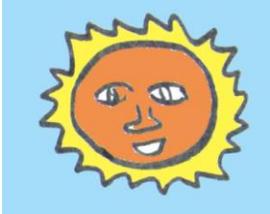
- CIS(CuInS_2)は直接遷移型半導体なので、光吸収係数はほかの半導体と比べて非常に大きく、このため、たった $1\sim 2\mu\text{m}$ という薄さの膜でも太陽光を強く吸収します。
- インジウム(In)の一部をガリウム(Ga)で置換したCIGSは、バンドギャップを 1.25eV 付近にもち、変換効率が高く、小面積セルでは20%という高い効率が報告されています。
- 大面積のモジュールにしても、シリコン多結晶太陽電池の変換効率と遜色ない16.7%の効率が得られます。



効率が10%として、1kWの電力を得るには 10m^2 の面積が必要。シリコンの厚みを $200\mu\text{m}$ とすると、体積は 2000cm^3 となり、シリコンの密度は 2.34 であるので、必要なシリコンの重量は約 5kg

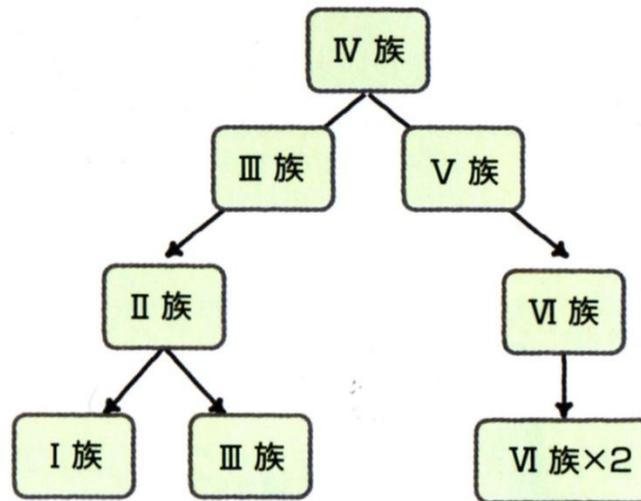
効率が10%として、1kWの電力を得るには 10m^2 の面積が必要。CISの厚みを $2\mu\text{m}$ とすると、体積は 20cm^3 となる。CISの密度は 5.77 であるので、必要なCISの重量は 115g 、金属(Cu+In)の重量は約 60g





CIGSについて

- CIGSとは、CIS(CuInSe_2)とCGS(CuGaSe_2)のアロイ(混晶)である $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ の略称です。
- CISはIV \rightarrow III-V \rightarrow II-VI \rightarrow I-III-VI₂とつづくダイヤモンド一家の末裔なので四面体配位の共有結合です。
- I-III-VI₂族には、太陽電池材料の候補となるものが多数あります。



- 例 シリコン (Si)
- 例 ガリウムヒ素 (GaAs)
閃亜鉛鉱構造(ZB)
- 例 テルル化カドミウム (CdTe)
閃亜鉛鉱構造(ZB)
- 例 セレン化銅インジウム (CuInSe_2)
カルコパイライト構造(CH)

化合物	バンドギャップ (eV)	格子定数(Å)		化合物	バンドギャップ (eV)	格子定数(Å)	
		a	c			a	c
CuInSe_2	1.04	5.79	11.60	CuInS_2	1.53	5.52	11.08
CuGaSe_2	1.6	5.61	11.01	CuGaS_2	2.5	5.35	10.48
CuAlSe_2	2.7	5.60	10.91	CuAlS_2	3.5	5.32	10.43
AgInSe_2	1.04	6.10	11.68	AgInS_2	1.9	5.82	11.18
AgGaSe_2	1.9	5.82	11.18	AgGaS_2	2.7	5.75	10.29
AgAlSe_2	2.55	5.96	10.74	AgAlS_2	3.13	5.70	10.26

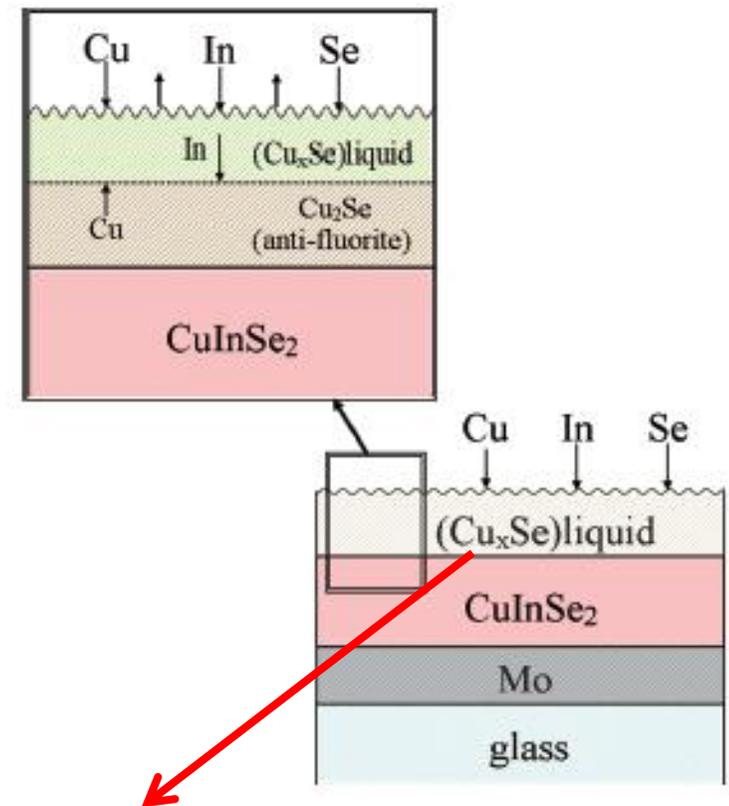
VI族がテルルのものは省略



CIGSの製造プロセス

(1) バイレーヤー法

- CIS 結晶はCIS 膜の表面に存在するCu-Se 系液相を介して成長します。
- 薄膜表面の拡大図に示したようにCu-Se 系液相が固相の Cu_2Se と共存し, この Cu_2Se と, 表面から拡散してきたIn とSe が反応してカルコパイライト型のCIS が生成します。
- Cu_2Se とCIS の間には, 3 次元的な結晶学的方位関係が存在します。
- 出発物と生成物の間に3 次元的に結晶学的な関係が存在する化学反応のことをトポタクティック反応 (Topotactic Reaction) といいます。



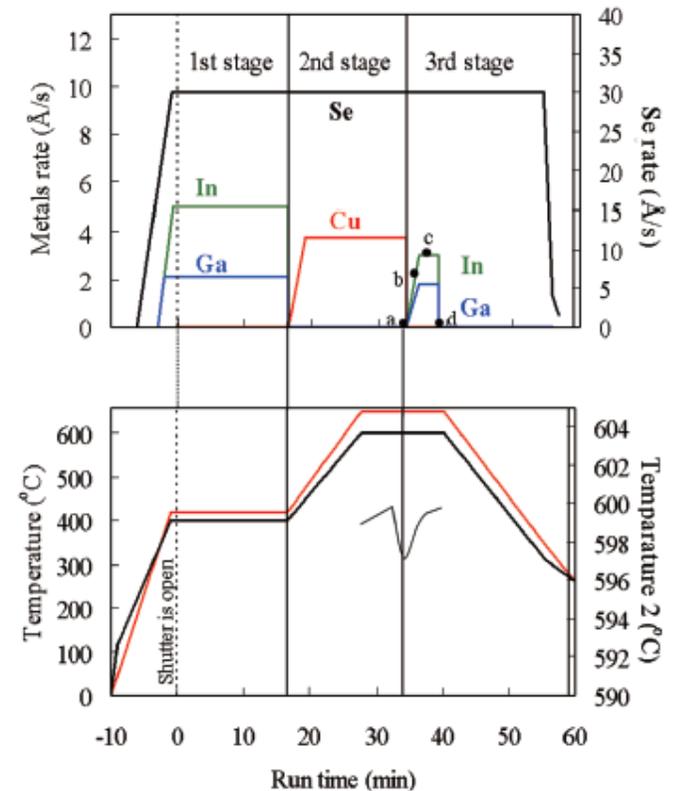
Cu_xSe はKCN処理
などで除去します。

和田: 日本結晶成長学
会誌Vol. 36, No. 4
(2009) 282による

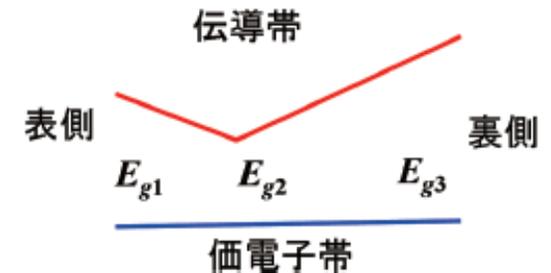


CIGSの製造プロセス (2) 三段階法

- 第一段階: 比較的低い400 °C程度の基板温度でIn,Ga,Seを蒸着して(In,Ga)₂Se₃膜を形成します。
- 第二段階: 基板温度を600 °C程度まで上昇させてCuとSeを蒸着して膜全体をCu 過剰 (Cu/(In+Ga) > 1) 組成にします。
- 第三段階: 再びIn,Ga,Seを照射して膜の最終組成をCu 不足 (Cu/(In+Ga) < 1) にします。



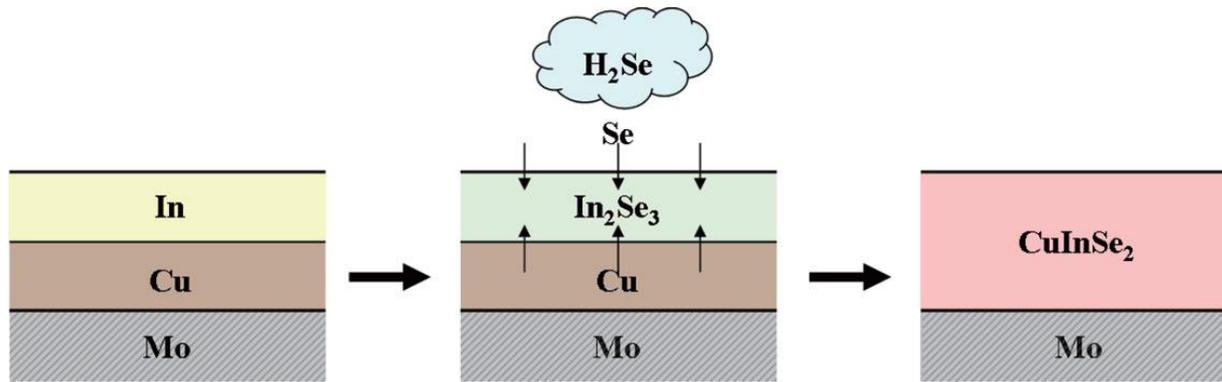
ダブルグレーデッドバンドギャップにより、開放端電圧 (Voc) と短絡電流密度 (Jsc) の両方を大きくできる。





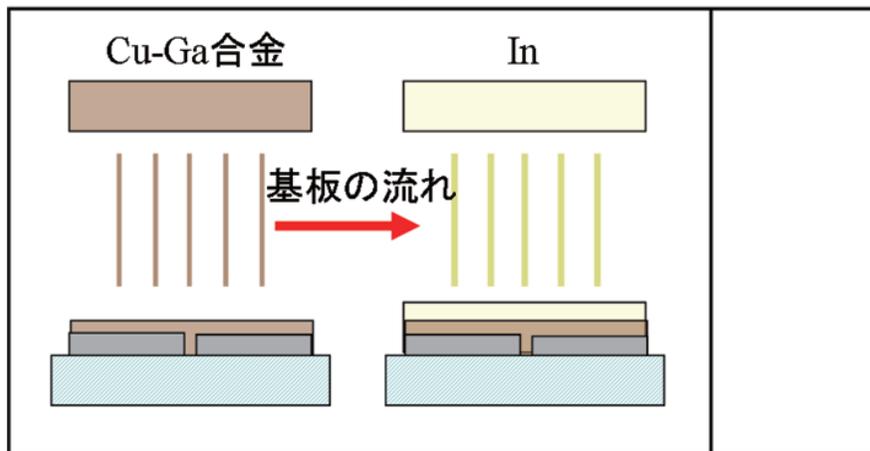
CIGSの製造プロセス

(3) セレン化法

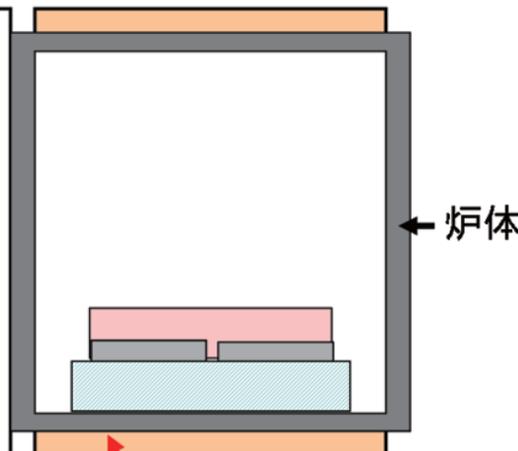


- Mo 裏面電極の上にCu, In の順に金属膜を形成.
- その積層膜をH₂Se ガス中で熱処理→まず表面のIn がH₂Se と反応してIn₂Se₃ が生成.
- 次に, そのIn₂Se₃ 中に裏面からCu が, 表面からSe が拡散して次第にIn₂Se₃ がCIS に変化.

金属プリカーサー膜製膜工程
(スパッタ装置)

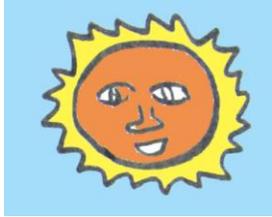


セレン化/硫化工程
(反応炉)



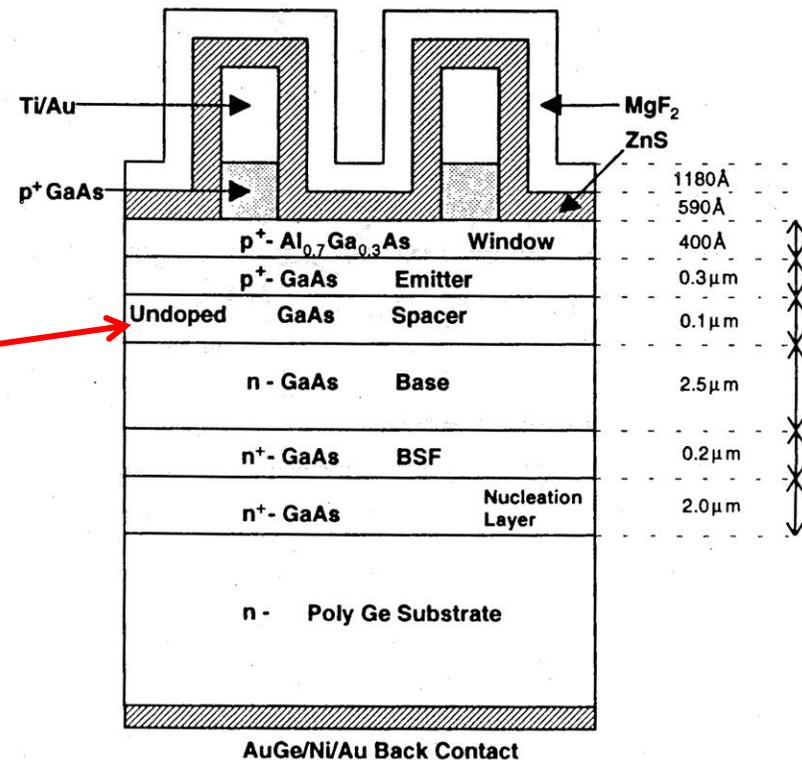
ストッカー

ヒーター



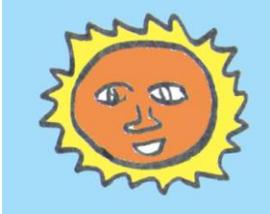
化合物系多結晶太陽電池の構造と 薄膜形成プロセス(3) III-V系

- キャスト法で作製した光学グレードの大粒径Ge多結晶基板の上にMOCVD法でGaAsを堆積します。
- 基板直上には高濃度のAsを含む n^+ 核発生層、次いで薄い n^+ 裏面障壁層、厚い n ベース層、薄い無添加スペーサ層、薄い p^+ エミッタ層、 p^+ AlGaAs窓層、 n^+ オーミック接触層、Ti/Au上面電極という複雑な構造を製作します。
- 開放端電圧はスペーサ層厚が薄い程大きな値になります。



多結晶Ge基板上の多結晶 p^+/n 接合GaAs太陽電池の構造

R. Venkatasubramanian, B.C. O'Quinn, E. Siivola, B. Keyes, R. Ahrenkiel: Conf. Rec. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. pp.811-814 (1997)



化合物半導体のバンド構造の特徴

(1) III-V族, II-VI族

- Siはダイヤモンド構造をとり、バンド構造は間接遷移型ギャップを示す。
- III-V族のGaAsとII-VI族のCdTeは、どちらも閃亜鉛鉱構造をとり、バンド構造は、いずれも直接遷移型バンドギャップを示す。
- 価電子帯は主としてカチオンのp軌道から成り立っているので、スピン軌道分裂 Δ_{so} はAsよりTeの原子番号が大きいことによってGaAs ($\Delta_{so}=0.35\text{eV}$)よりCdTe($\Delta_{so}\approx 0.9\text{eV}$)のほうがはるかに大きい。

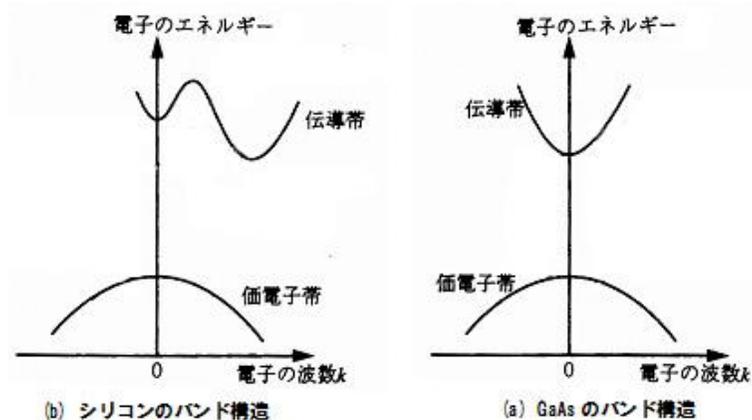
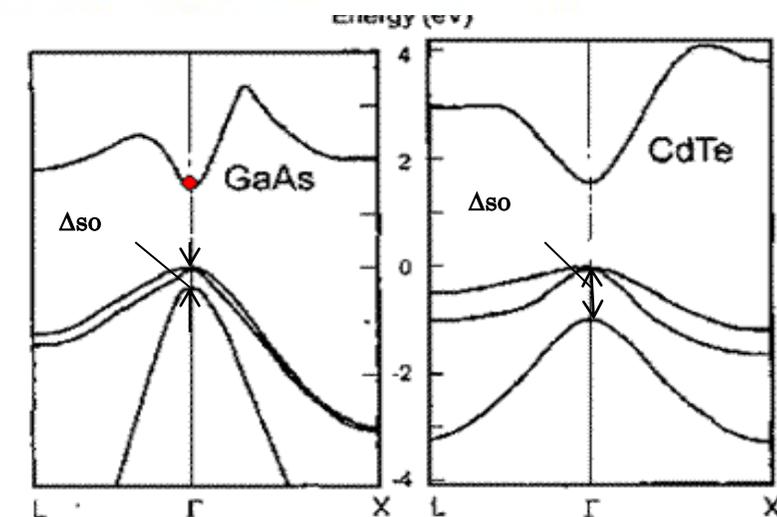


図1 電子の波数 k を横軸として描いたシリコンとGaAsのバンド図



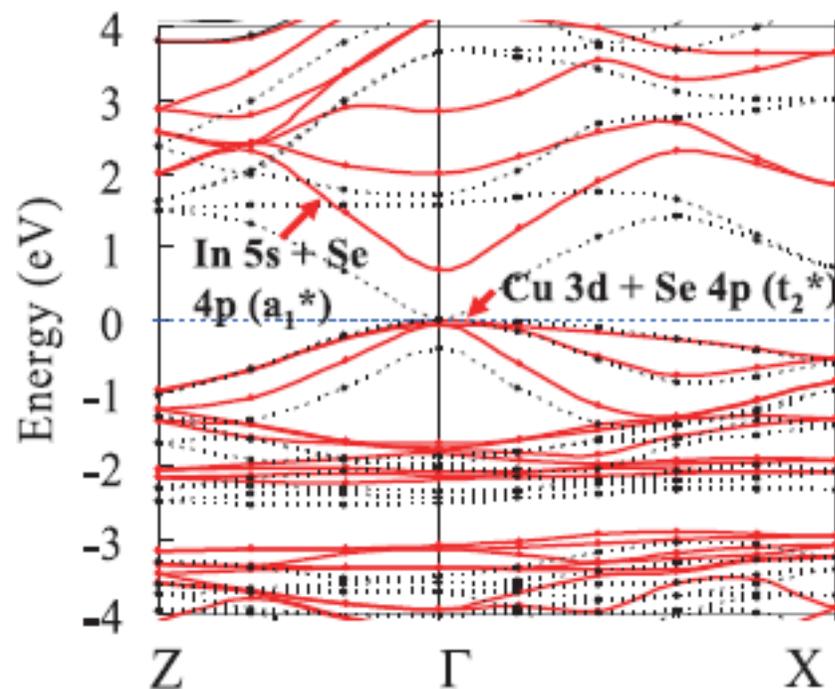
GaAsとCdTeのバンド構造の模式図



化合物半導体のバンド構造の特徴

(2) I-III-VI₂族

- CuInSe₂のバンド構造は図に示すように価電子帯が非常に複雑な様相を見せます。
- これは、Cu-III-VI₂系のカルコパイライト型半導体に特有です。価電子帯はSeの4p軌道とCuの3d軌道が混成した状態からできていることによります。
- 分子軌道法のことばでいうと価電子帯の頂はCu3dとSe4pの反結合状態に対応し、伝導帯の底は、In5sとSe4pの反結合状態に対応します。
- バンドギャップは、反結合軌道同士の間を開いています。



CuInSe₂のバンド構造

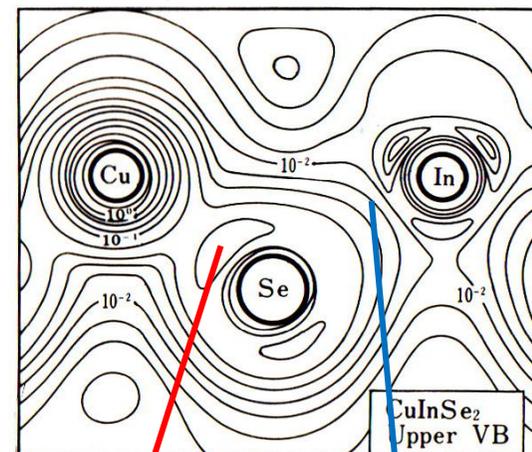
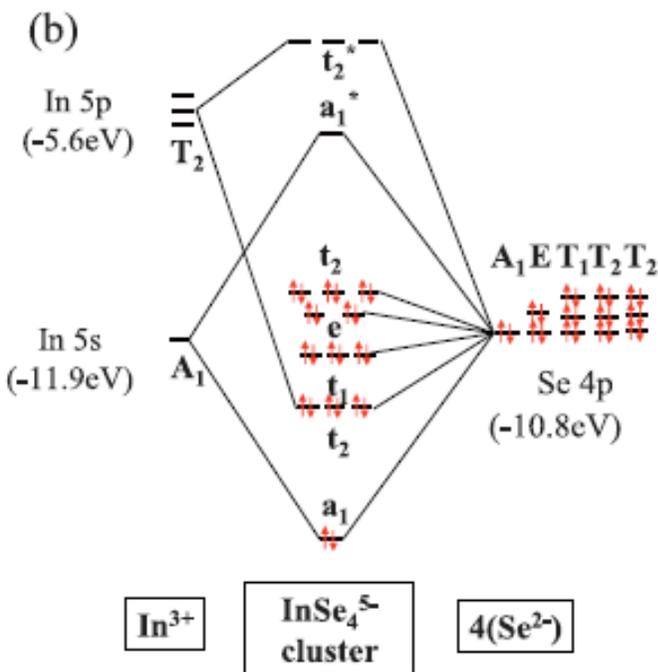
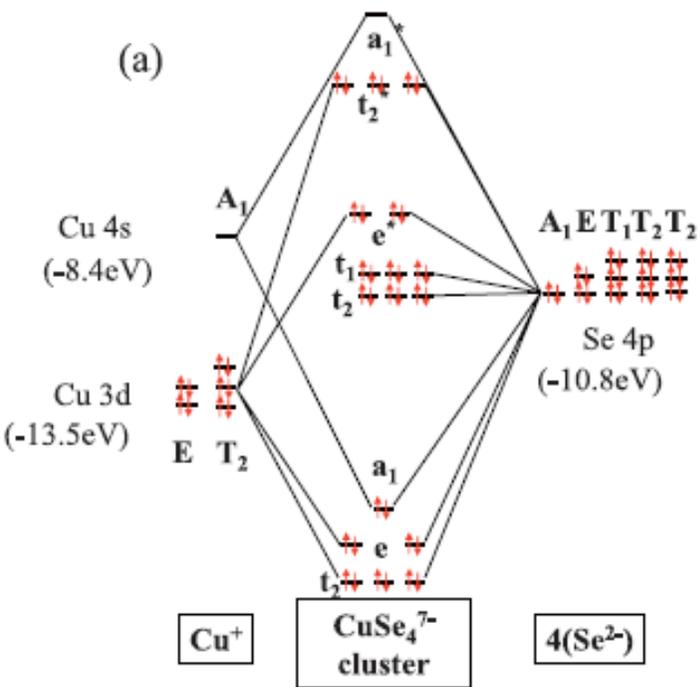
(LDA計算では、点線のようにバンドギャップが開かないが、sX-LDA法では、実線のようにΓ点に直接ギャップが開く。)

T. Maeda and T. Wada: phys. status solidi
(c) **6**, 1312-1316 (2009)



CuInSe₂における2つの結合

- CISはCuおよびInにSeが四面体四配位した局所構造を持っています。(a)はCuSe₄⁷⁻、(b)はInSe₄⁵⁻の四面体型クラスターの分子軌道のエネルギー準位図です。



共有的

イオンの

Cu-Se結合あたりの平均結合次数は1/4になり、非常に弱い結合

In-Se結合あたりの平均結合次数は1になり、かなり強いと考えられる。

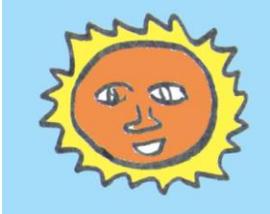
CISの結晶を成り立たせているのはInとSeの結合



化合物半導体の真性欠陥

(1) III-V族

- 化合物半導体は、Siのような元素半導体と比べて遙かに多数の真性欠陥をもちます。
- Siの真性欠陥はSiの空孔 V_{Si} および格子間原子 $[Si]_i$ およびこれらの複合欠陥しかありません。
- これに対して、GaAsの真性欠陥は、空孔 V_{Ga} , V_{As} , 格子間原子 $[Ga]_i$, $[As]_i$ に加え、アンチサイト欠陥 $[As]_{Ga}$, $[Ga]_{As}$ が存在します。

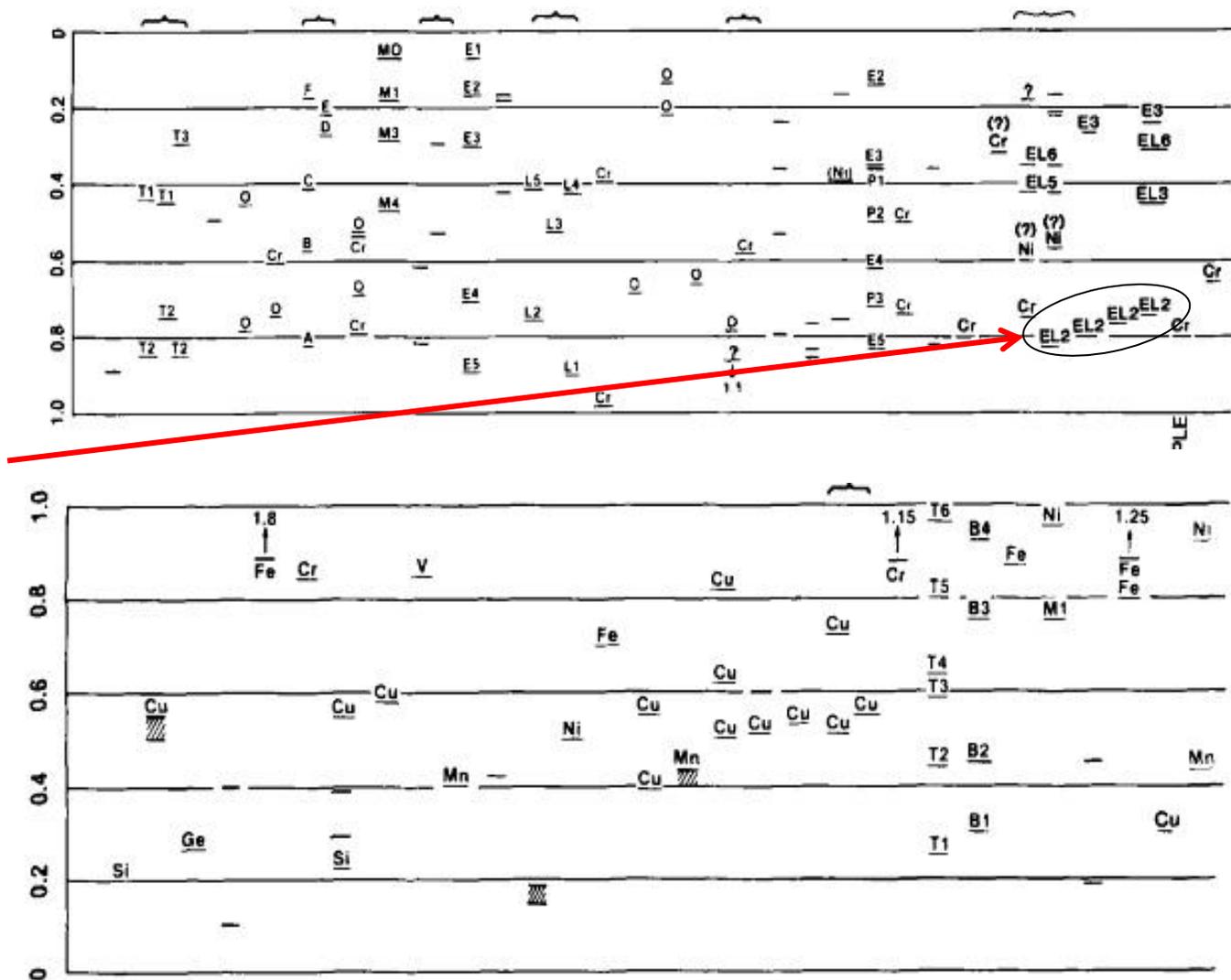


GaAsにおいて観測されている電子トラップ準位 およびホールトラップ準位

伝導帯底からの
エネルギー(eV)

EL2と名付けられた欠陥
は、アンチサイト欠陥
[As]_{Ga} が関与する複合
欠陥で、その相手は、格
子間原子 [As]_iとも空孔
V_{As}ともいわれているが
決着はついていない。

価電子帯頂からの
エネルギー(eV)

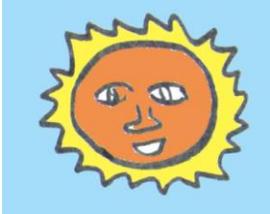




化合物半導体の真性欠陥

(2) CdTe

- CdTeには、 V_{Cd} , V_{Te} , $[\text{Cd}]_i$, $[\text{Te}]_i$, $[\text{Cd}]_{\text{Te}}$, $[\text{Te}]_{\text{Cd}}$ などの真性欠陥およびそれらの複合欠陥準位があります。
- CdTeが通常p型になるのは、 V_{Cd} によると考えられます。CdTeのCdサイトにInを置換しようとしても、 V_{Cd} との複合欠陥をつくり、ドーパしたキャリアを補償してn型になりません。
- したがって、CdTe系太陽電池には、p型CdTeとn型CdS(アニオン空孔によって無添加でn型になりやすい)とのヘテロ接合が用いられます。



化合物半導体の真性欠陥

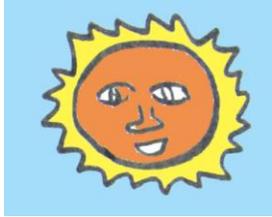
(3) CIS

- 三元化合物CuInSe₂となると、欠陥の種類はさらに増える。カチオン空孔 V_{Cu} 、 V_{In} 、アニオン空孔 V_{Se} 、格子間原子 I_{Cu} 、 I_{In} 、 I_{Se} 、さらに、置換欠陥 $[Cu]_{In}$ 、 $[In]_{Cu}$ 、および複合欠陥が見られる。
- 表は、CuInSe₂中の主な欠陥の生成エネルギーである。計算方法によってかなりのばらつきがあるが、 V_{Cu} が形成されやすいことがわかる。

表4. CuInSe₂における欠陥生成エネルギー

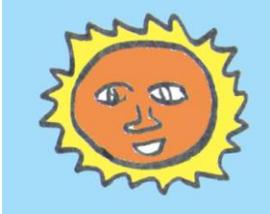
	Neuma nn	Möller	Zhang	Wada
V_{Cu}	2.6	3.2	-0.89	-0.81
V_{In}	2.8	2.4	1.73	0.37
V_{Se}	2.4	2.6	3	1.7
$[Cu]_i$	4.4	-	3.56	-
$[In]_i$	9.1	-	-	-
$[Se]_i$	22.4	-	-	-
$[Cu]_{In}$	1.3	1.9	1.37	-
$[In]_{Cu}$	1.4	1.6	2.89	-

CuInSe₂が通常p型伝導を示すのは V_{Cu} アクセプタによる。



CIS太陽電池の接合

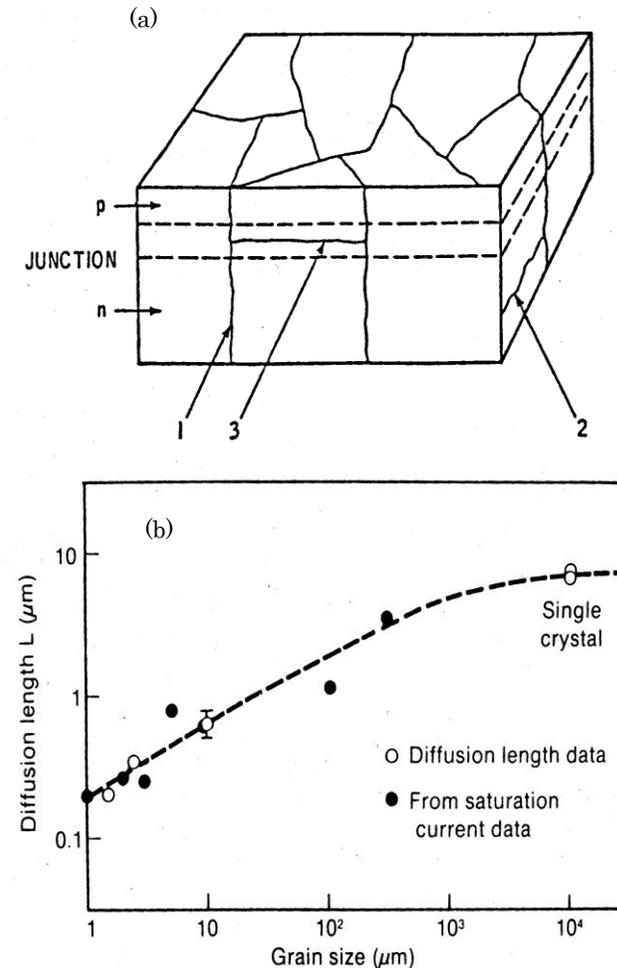
- CIS系太陽電池には、p-CuInSe₂とCBD(化学浸漬法)n-CdS、n-ZnS等のヘテロ接合が用いられます。
- n-CdSをCBD成膜する際にII族元素がCIS中に拡散し、CuInSe₂内にburied junctionを形成しており、純粹のヘテロ接合ではないと考えられている。
- 単結晶CISで効率がでないのは、CIS結晶にCdSをエピしても、buried junctionができないことが一因かもしれません。
- 接合界面のバンドプロファイルについては、仁木らが詳細な研究をしています。(日本セラミクス協会編「太陽電池材料」5.3節)これによれば、CdS/CIGS界面での伝導帯のバンド不連続は、Ga組成が25%付近だと0.2-0.3eVであるが、40-50%では、バンド不連続が0になり、さらに増加すると負になるとのことです。

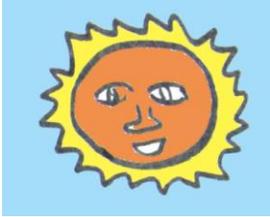


多結晶化合物太陽電池の課題

結晶粒のサイズと転位密度の効果(1)GaAs

- 多結晶GaAs系において結晶粒界はキャリアの再結合中心として働くため大きな粒径が必要です。図は、(a)のような粒径モデルにおいて計算で得られたGaAs多結晶太陽電池における少数キャリア拡散長を粒径に対してプロットしたものです。
- これにより、単結晶並みの少数キャリア拡散長を得るには、mmサイズの結晶粒を有する多結晶膜が必要ですが、デバイス構造の工夫によって100 μm 程度でも高効率化画可能であるとされています。

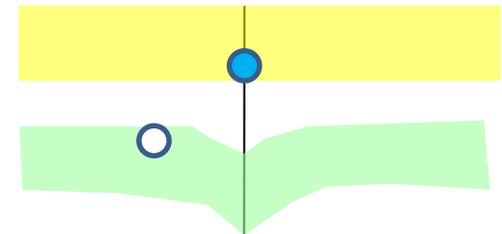


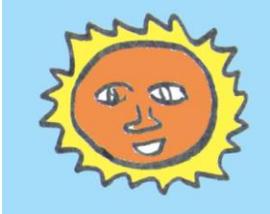


多結晶化合物太陽電池の課題

結晶粒のサイズと転位密度の効果(2) CIS

- 一方、CIGSで実用化されているのは粒径 $1\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ の多結晶薄膜が使われています。
- なぜ、GaAs多結晶ではmmサイズが必要なのに、CIGS系では μm サイズでよいのでしょうか？
- Pearson, Zungerらは、CIGS薄膜においては、粒界付近で価電子帯頂の低下が起きて、結晶粒内部のホールの障壁となって粒界での再結合を防いでいると考えており、その後の高解像度TEM観察で裏付けられました。

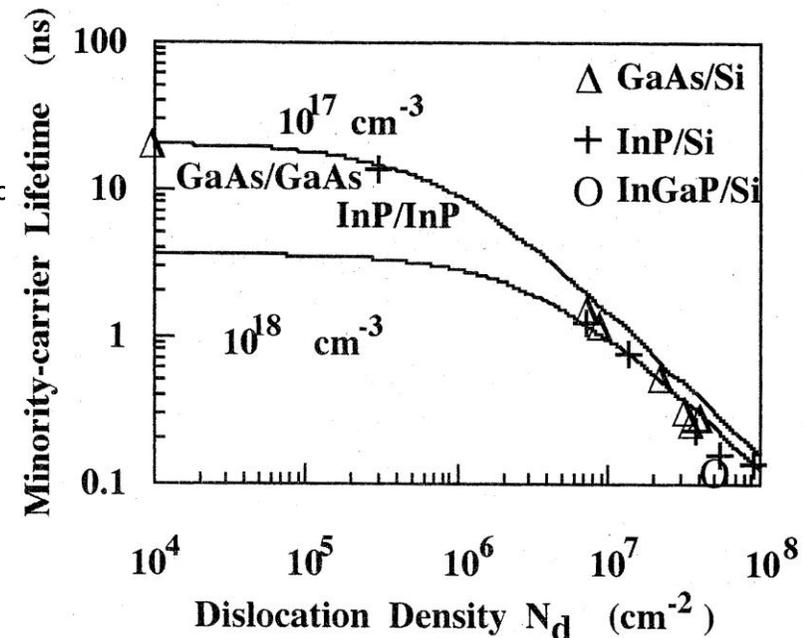




多結晶化合物太陽電池の課題

転位によるキャリア再結合

- GaAsにおいては粒径が大きいので転位によるキャリア再結合も問題です。図はSi基板上的GaAs, InPおよびInGaPの少数キャリア拡散長の転位密度依存性の実測値と計算された曲線です。密度が 10^7 を超えると非常に性能が劣化します。
- これは、単結晶についての結果ですが、多結晶についても問題になるはずです。
- 多結晶において、転位密度を制御するのは、単結晶よりはるかに困難です。
- CIGSにおいても転位があると考えられますが、粒径が小さいことで転位が入りにくい、転位が再結合に寄与しないのではないのでしょうか。



GaAs, InPおよびInGaPの少数キャリア拡散長の転位密度依存性の実測値と計算曲線



CIGS太陽電池の課題

- CIGS 太陽電池の最高の変換効率は1.1 ~ 1.2 eV の E_g をもつ Ga/(In+Ga)比の膜で得られています。
- 単接合太陽電池での理想的な E_g である1.4 eV を持つCIGS 膜を用いれば、20 %を大きく越える変換効率が期待されます。
- しかし、現実には、Gaの組成比が増加すると結晶性が低下するという問題もある。また、高効率が得られているのは、薄膜においてバンドギャップの勾配をつけたものに限られているというのも本質的な問題がありそうです。
- 和田は、今後シングルセルで変換効率25 %、タンデムセルで40 %という高い目標を達成するためには、CIGS という多元系半導体を十分に理解して、基礎および応用の両面にわたって幅広く研究開発を推進していくことが必要であると述べています。



CIGSタンデムセルの課題

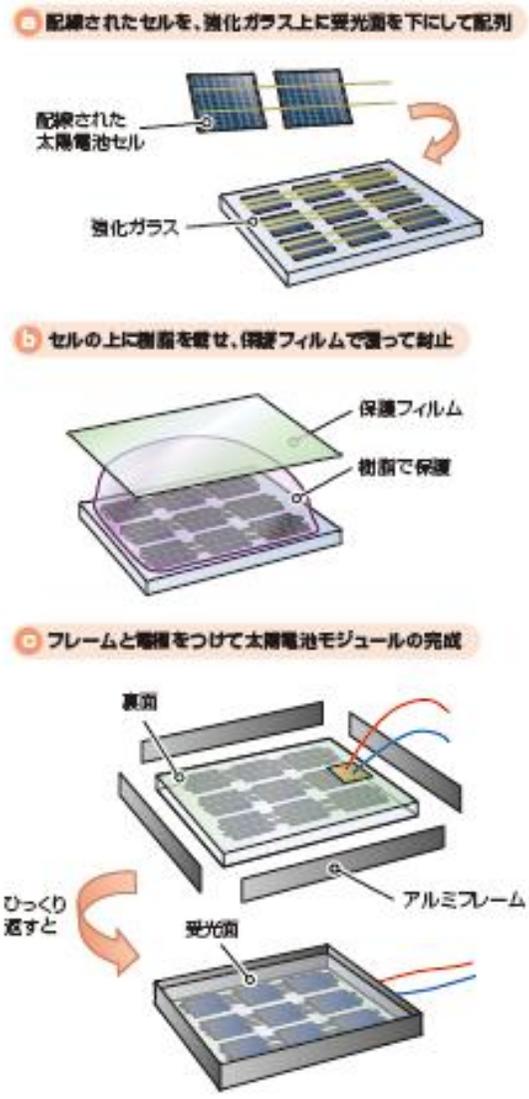
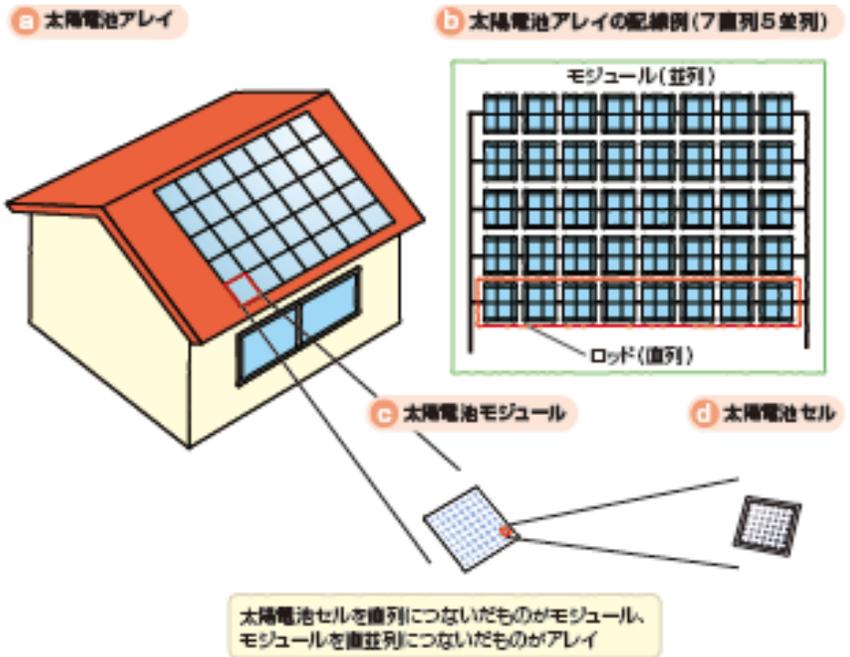
- CIGS系タンデムセルの理論変換効率の図から、上部セルの E_g が $1.6\sim 1.8\text{eV}$ 、下部セルの E_g が $0.9\sim 1.2\text{eV}$ の範囲で25%以上の変換効率が期待されます。
- CIGS系タンデム太陽電池の実現には多くの課題があります。
 - 上部セルの高効率化(16%以上)
 - 上部セルの高透過率化
 - 下部セルを損傷しない成膜法の開発
 - 電流マッチング

(日本セラミクス協会編「太陽電池材料」5.4節)



モジュールの効率なぜ低下？

- セル→モジュール
→アレイ





CIGSモジュール製造過程

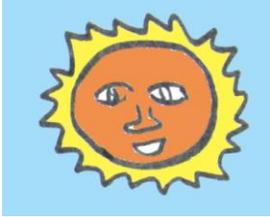
図表Ⅱ.8 化合物系（CIGS）太陽電池の代表的な製造プロセスと主な原材料・部材、製造装置

製造プロセス	概要	主な原材料・部材	主な製造装置	
セル形成	①金属裏面電極層形成	・ガラス基板の上に、スパッタ法により、金属（モリブデンが一般的）を材料とした裏面電極層を製膜	・ガラス基板 ・Mo（モリブデン）	・スパッタリング装置
	②パターニング1	・各セルの直列接続を行うため（以下計3回のパターニング）、裏面電極層を削ってパターン1を形成	—	・レーザースクライビング装置
	③Cu-In-Ga膜製膜	・CIGS光吸収層の一部として、Cu-In-Gaからなる金属ブリカーサをスパッタ法によって製膜	・Cu-In-Ga金属ブリカーサ	・スパッタリング装置
	④セレン化	・上記②で形成された薄膜を希釈したセレン化水素（H ₂ Se）雰囲気中で熱処理し、CIGS層を形成	・希釈H ₂ Seガス	・熱処理炉
	⑤バッファ層製膜	・上記のCIGS層を強アルカリ性水溶液中に浸し、溶液成長法によってバッファ層を製膜	・金属塩（Zn塩） ・触媒（チオウレア）	・溶液成長装置
	⑥パターニング2	・②の工程に続き、CIGS層・バッファ層を削ってパターン2を形成	—	・メカニカルスクライビング装置
モジュール	⑦透明導電膜窓層形成	・バッファ層の上に、MOCVD法により、透明導電膜窓層（ZnO:B膜）を製膜	・ZnO（酸化亜鉛）ガス	・MOCVD装置
	⑧パターニング3	・⑥の工程に続き、透明導電膜を削ってパターン3を形成	—	・メカニカルスクライビング装置
	⑨電極形成	・バスバー電極（アルミニウム）を裏面電極層上にはんだ付け	・アルミニウム ・無鉛はんだ	・はんだ付け装置
	⑩ラミネーション	・上記までの工程で、ガラス基板上に形成されたCIGS層等を、封止材とカバーガラスを用いて封止	・封止樹脂フィルム ・カバーガラス	・ラミネート装置
	⑪フレーミング、端子取付	・上記までに形成したモジュールにアルミフレーム（外枠）等を取り付け	・アルミフレーム	・フレーミング装置
⑫特性検査	・上記の工程を経て製造されたモジュールに疑似太陽光を照射して、モジュール性能の最終検査を行う	—	・モジュールテスター	

プロセス各段階でパターニングが入る

化合物太陽電池のふしぎは解決？

- Si太陽電池ではバルク多結晶が使われているのに、GaAsのバルク多結晶太陽電池がないのはなぜ？ → GaAsやCIGSはSiより2ケタも吸収が強いので、バルクだと内部に光がとどかない。またcast-GaAsの粒界が問題。
- CIGS太陽電池では多結晶薄膜で高効率が出てきているのに、GaAs多結晶薄膜では効率がでないのはなぜ？ → 結晶粒界や転位は、GaAsではキャリア再結合中心になるが、CIGSではキャリアトラップにならないらしい。
- CIGSは、バルク単結晶では効率がでない。多結晶薄膜のほうが高効率なのはなぜ？ → 高効率の薄膜多結晶CIGS太陽電池では、バンドギャップのプロファイルが、両側で大きく、真ん中で低いダブルグレーデッドになっている。単結晶ではこのようなプロファイルがつかれないことが原因か。



おわりに

- 理論的に高い効率が期待される化合物太陽電池について、低コストで高効率な多結晶薄膜太陽電池の実現を目指すためには、真性欠陥、粒界、転位などのもたらす問題点をきちんと理解するとともに、これまでに培われた材料選択、成膜技術、評価技術などを総動員して、総合的に問題の解決を図ることが求められている。これらは、まさに、結晶工学の出番である。ぜひ多くの研究者の参画を促したい。

イチバン
やさしい
理工系

オールカラー

イチバン
やさしい
理工系

太陽電池

のキホン



新エネルギーの
切り札となる
最新技術のしくみ

佐藤勝昭

Katsunaki Sato

低炭素社会を実現する太陽光発電のバワーと現状
半導体を知ることが技術を理解するカギ
高効率化のための新しい太陽電池テクノロジー

佐藤勝昭

SoftBank
Creative

SoftBank Creative

オールカラー図解でしくみがわかる

SBE-013

太陽電池をより身近に

佐藤勝昭さん(区内在住)が執筆

「自分の経験と知識を、次の世代にわかりやすく伝えたい」とそんな思いから、一冊の本が生まれた。

佐藤勝昭さん(69歳・王禅寺西在住)が、高校生から社会人まで広く楽しめる本『太陽電池』のキホン』(ソフトバンククリエイティブ株式会社)を執筆。先月



第一人者としての知識と経験が集約されている

末に発売された(税込1575円)。佐藤さんは東京農工大学の名誉教授。「10年後、20年後に中心となって活動できる技術者を」という信念のもと、独立行政法人で若い科学者の育成にも取り組んできた。

フルカラーで190ページ、全7章から成る内容は

「入門編」から「上級編」に分けられている。絵を見ただけで概要がつかめるようにと工夫を凝らし、全てのページに自らが手がけた絵や表を載せた。

「入門編」は太陽電池にまつわる身近な疑問や豆知識など、科学に馴染みの無い人にも読みやすい内容。これまでに無かった、一般書よりも詳しく、専門書よりも親しみやすい内容を目指した。

「こんな時代だからこそ、科学の力を信じて不可能を可能に変えてもらいたい」と、佐藤さんは話している。同書はネットを中心に発売中。麻生図書館でも閲覧できる。



謝辞

- この小稿をまとめるに当たって、今回の研究会の企画者である産総研の反保様に貴重な資料を提供いただきました。
 - 平成9年度太陽光発電技術研究組合研究成果報告書「III-V族多結晶太陽電池の可能性調査」(1998.3)
- また、龍谷大学の和田先生には、CIGSに関連した最近の研究資料をお送りいただきました。ここに深く感謝します。