

第 4 章

# さまざまな太陽電池 (上級編)

ひと口に太陽電池といっても、  
使われる材料や製法などによって、性能やコストは大いに違います。

また資源の問題も重要です。

この章では、結晶系シリコンからさまざまな薄膜太陽電池、  
さらにはホットな話題を集める有機太陽電池までを、わかりやすく解説します。



## 太陽電池材料のバリエーション① 太陽電池の分類

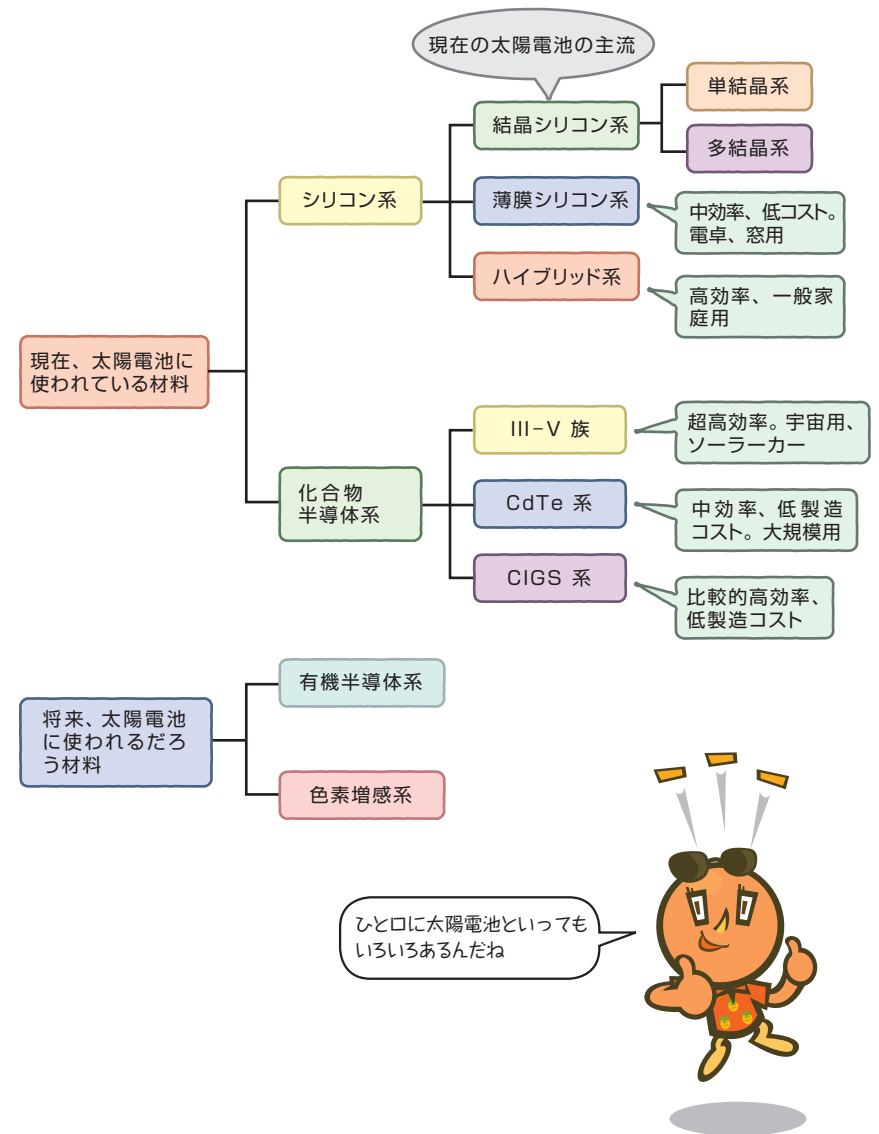
太陽電池を材料で分類したのが図1です。現在、太陽電池に使われている半導体材料は、シリコン系と化合物半導体系に大別されます。シリコン系には、バルク結晶を用いる結晶シリコン系と、薄膜を用いる薄膜シリコン系、バルク結晶と薄膜のハイブリッド系があります。

結晶シリコンは、もっともよく使われている太陽電池用半導体材料です。結晶シリコンのうち単結晶系は、効率が高いのですがコストも高いのが欠点です。もっとも普及しているのは、多結晶系(小さな結晶がモザイク状に集まったもの)です。効率は少し低くなりますが、単結晶の切断くずを溶解してつくるシリコンの「鋳物」なので、省エネルギー・低コストで製造できます。結晶系シリコン太陽電池は、原料をたくさん使うのが問題です。これに対し薄膜シリコンは、アモルファスシリコンや微結晶シリコンを使うので、低温で大面積を高速成膜でき、製造コストが低いほか、結晶シリコンの10分の1以下の厚みでよいので省資源です。しかし、効率がやや低いことと、光劣化が起きることが問題です。最近、結晶シリコンに薄膜シリコンをつけたハイブリッド系が開発され、高効率な太陽電池として期待されています。

化合物半導体系には、III-V族とCdTe系、CIGS系などの薄膜系があります。III-V族は、GaAs単結晶基板にさまざまな組成比のIII-V族半導体薄膜を層状に成膜したもので、高い変換効率を発揮する超高性能太陽電池ですが、高価なのでおもに宇宙用に用いられています。CdTe系、CIGS系は薄い膜でも中程度の効率が得られ、省資源であり製造コストが安いので、普及が始まっています。

これに加えて、有機半導体系や、少し発電原理の異なる色素増感系の研究が進められていますが、市場に現れるのはこれからです。

図1 材料による太陽電池の分類



- 太陽電池材料は大きく分けてシリコン系と化合物半導体系がある
- シリコン系には結晶系、薄膜系とハイブリッド系がある

### 用語解説

光劣化 → アモルファスシリコンセルにおいて太陽光を照射中に変換効率が低下する現象。発見者にちなんで、ステプラー・ロンスキー効果という。詳細は(046)を参照

## 太陽電池材料のバリエーション② 太陽電池の比較

表1 太陽電池の比較

材料による分類	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			
シリコン系	単結晶系	22.7	24.5	2.05*	△	高い変換効率。安定。Si材料の多消費に難
	多結晶系	17.0	20.4	1.82*	△	比較的高効率、普及。材料供給に難
	薄膜系	10.4	20.0	1.37*	○	低コストで大面積可能。省資源。低効率と光劣化に難
化合物半導体系	III-V族系	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 <sup>§</sup>	○	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 <sup>+</sup>	△	低コスト、大量生産。中効率。Cd使用が問題
化学系	色素増感系	8.5	11.2	0.75-3.3 <sup>#</sup>	○	低コスト、省資源。中効率。液体使用が難。光劣化も
	有機半導体系	3.5	7.9	1-2.84 <sup>#</sup>	○	低コスト、省資源。中効率

\* 2010年12月の最低価格(<http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>)  
& 2008年: Nanosolar社の発表(role-to-role)  
+ 2009年: First Solar社の発表

# 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のも

種々の太陽電池のセル変換効率・モジュール変換効率のチャンピオンデータ(2010年時点)および記載のあるモジュールコストの一覧表

### 用語解説

直接遷移型半導体、間接遷移型半導体 → 半導体のバンドギャップを超えるエネルギーの光をあてると、電子は価電子帯から伝導帯に飛び移り光吸収が起きる。この過程で運動量保存則が成り立つと光吸収が強いが、成り立たないと光吸収が弱い。前者を直接遷移型半導体、後者を間接遷移型半導体という。くわしくは第5章(066)~(070)を参照

表1は(037)で述べたさまざまな材料の太陽電池の、セル効率およびモジュール効率、コスト、材料に関連する資源問題、各電池の特徴をまとめたものです。

多結晶シリコンのモジュールは、かなりの高効率でコストも低く、1950年以降の研究開発に支えられて性能も安定しています。これまでの普及型の家庭用太陽電池モジュールは、ほとんどこのタイプでした。それでは、なぜこんなにたくさんのバリエーションが研究開発されているのでしょうか？

第1は材料問題です。シリコンそのものは地球上に非常にたくさん存在するのですが、最近では需要が多くなって原料が足りなくなってきました。

また、シリコンは間接遷移型半導体と呼ばれるものなので、光吸収が弱く、数百μmの厚みが必要です。つまり数μmの薄膜では光が通り抜けてしまいます。薄膜シリコン太陽電池は、実は水素化アモルファスシリコンという、結晶シリコンとは別の物質です。薄い膜を低コストでつくれるのですが、効率があまり高くなく、光劣化の問題があるので、薄膜シリコン系太陽電池では微結晶シリコン薄膜と組み合わせて使っています。

直接遷移型半導体を使えば、発電効率の高いものが得られます。GaAsなどのIII-V族化合物半導体系太陽電池は変換効率が非常に高く、同じ電力を得るのに小面積ですむという利点があります。III-V族系は、基板材料として用いるGaAsが高価なうえに、非常に高度な製造技術を用いるために高コストで、宇宙用など特殊用途にしか用いられていません。CdTeやCIGSなども直接遷移型半導体です。これらの化合物系多結晶薄膜太陽電池は、III-V族ほど高効率ではありませんが、大面積の数μmの薄い膜を低コストでつくれるので、材料コストという点で有利です。



- 単結晶シリコン大面積モジュールの変換効率は約23%と高い
- 化合物系モジュールは電力あたりのコストがシリコン系より低い

# こんなに違う！ 半導体の光吸収スペクトル

太陽電池は半導体が光を吸収することによって電気をつくりだします。光吸収の強さは、半導体ごとに異なります。光吸収の程度を表すのが**光吸収係数 $\alpha$** です。これは、光が物質中を1cm進んだときに、光の強度がどれだけ小さくなるかを表すときの尺度です。光は、半導体中に $1/\alpha$ の距離だけ進入できます(用語解説参照)。

第1章の(013)において、半導体にはバンドギャップがあり、このバンドギャップより小さなエネルギーをもった光は吸収されないことを学びました。半導体の光吸収係数は、入射する光がもつ光子エネルギーによって大きく変わります。光吸収係数を光子エネルギーに対して描いたグラフのことを、**光吸収スペクトル**といいます。

図1は、太陽電池に使われるさまざまな半導体の光吸収スペクトルです。光は、波長が短いほど大きな光子エネルギーをもちます。波長 $\lambda$ [nm]と光子エネルギー $E$ [eV: エレクトロンボルト]の間には、

$$E = 1239.8/\lambda$$

の関係があるので、グラフの右ほど波長(上目盛)が短くなります。

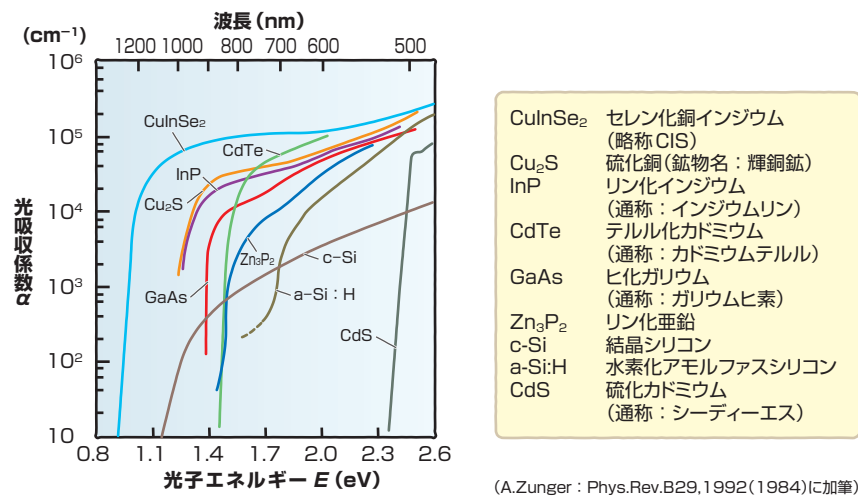
どの半導体においても、光吸収係数はバンドギャップの光子エネルギーの位置で立ち上がり、エネルギーの増加とともに吸収が強くなっています。この吸収の立ち上がり位置を**光学吸収端**と呼びます。

図1を見ると、結晶シリコン(c-Siと記載)では、光学吸収端での光吸収係数の立ち上がり方がゆるやかであるのに対し、CuInSe<sub>2</sub>(CIS)では立ち上がりが急峻で、吸収係数も結晶シリコンより2桁も大きいことがわかります。同じ光吸収の量を得るために、CISなら結晶シリコンの1/100の厚みでもよいのです。このように、半導体の光吸収スペクトルは、太陽電池を作製するときの重要な情報を与えてくれます。

**要点 Check!**

- 半導体では光子エネルギーが光学吸収端より大きいときに光を吸収する
- 光吸収係数の立ち上がりがゆるやかなものと、急なものがある

図1 さまざまな太陽電池用半導体の光吸収スペクトル



### 用語解説

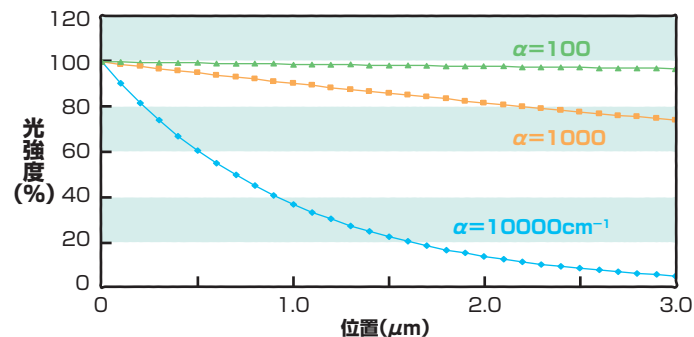
#### 光の減衰の様子を表す光吸収係数

半導体に $I_0$ という強さをもった光が入射したとする。この光が半導体中を $x$ [cm]進んだとき、光吸収係数を $\alpha$ とすると、光の強さ $I(x)$ は、

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

で表される。図は3つの $\alpha$ の値に対し、光の減衰の様子を描いたものである。 $\alpha = 10^4 \text{cm}^{-1}$ ならば、 $x = 1/\alpha = 10^{-4} \text{[cm]} = 1 \text{[}\mu\text{m]}$ 進んだとき、入射光の $1/e = 0.37$ に減衰する。厚み $3\mu\text{m}$ では光強度は5%以下になる。つまり、ほとんどの光が吸収される。これに対して $\alpha = 10^3 \text{cm}^{-1}$ なら、 $3\mu\text{m}$ 進んでも光強度は74%もある。 $\alpha = 100 \text{cm}^{-1}$ では光はほとんど吸収されない。このように、 $\alpha$ は物質中の光の減衰を表す尺度であることがわかる。

図 光吸収係数と光の減衰の様子を表すグラフ



## 75%のシェアを誇る 結晶系シリコン太陽電池①

**結晶系シリコン太陽電池**は、1950年代からの歴史があるため、信頼性が高く、世界の太陽電池生産量の75%を占めています。結晶系には、単結晶と多結晶があります。ここでは、その違いについて述べるとともに、共通の技術と課題について紹介しましょう。

### 単結晶と多結晶の相違点

単結晶というのは、**図1**の(a)のように、原子の配列の規則性が材料全体にわたって保たれているものをいいます。シリコン単結晶は、結晶全体にわたって配列の規則性がきちんと保たれ、乱れがありません。多結晶のように粒界がないので、キャリアの再結合が少なく高性能です。ただし製造コストが高いのが難点です。

一方、多結晶というのは、(b)のように材料全体が多数の結晶粒(グレーン)からできていて、結晶粒内部の規則性は保たれていますが、粒同士の方位関係は不規則であるようなものをいいます。多結晶シリコンは単結晶シリコンの切断くずを溶かして鋳型に入れて固めたもので、シリコンの鋳物なので低コストです。結晶粒界(結晶粒と結晶粒の境目)には結晶欠陥があって、光でつくったキャリアがとらえられるため、単結晶に比べて変換効率が劣ります。

### 単結晶と多結晶の共通点

**図2**は、結晶シリコンの光吸収スペクトルです。光学吸収端の1.13eVよりわずかに高い光子エネルギーの1.25eVにおける光吸収係数 $\alpha$ は、約 $100\text{cm}^{-1}$ にすぎません。(039)で述べたように、光はシリコンの内部 $1/\alpha = 0.01\text{cm} = 100\mu\text{m}$ 程度まで進入します。したがって、シリコン太陽電池は $100\mu\text{m}$ 以上の厚みがないと、入射した光が通り抜けてしまって電気をつくることができないのです。このため、結晶系シリコン太陽電池には $150\sim 300\mu\text{m}$ もの厚いシリコンウェハーが使われています。



- 単結晶は配列の規則性が保たれ、高性能だが高コスト
- 多結晶は多数の結晶粒からなり、性能は落ちるが低コスト

図1 単結晶と多結晶の原子配列の違い

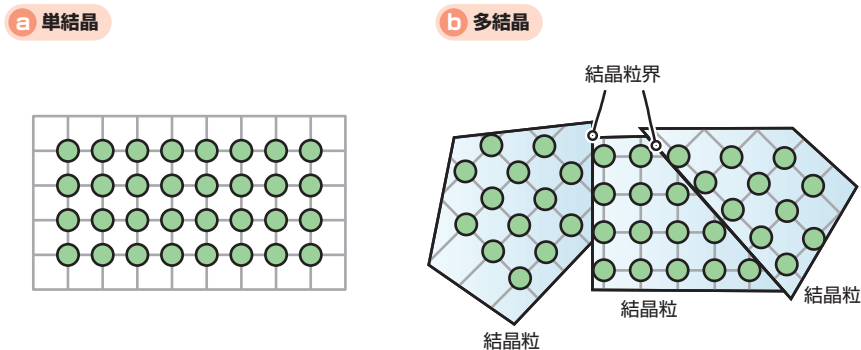
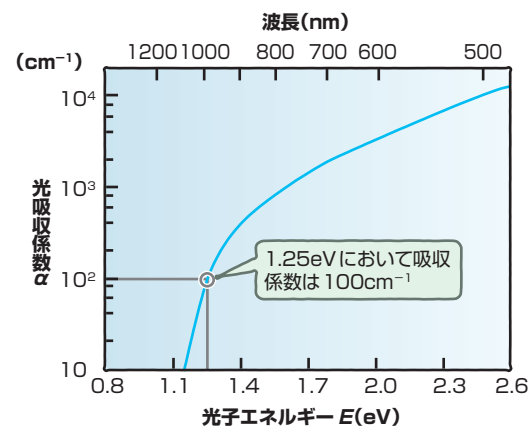


図2 シリコン結晶の光吸収スペクトル



光吸収係数 $\alpha$ を光子エネルギー $E$ に対して描いたグラフ。縦軸は対数目盛。バンドギャップ(1.13eV)付近で光吸収が始まり、光子エネルギーの増加とともにゆるやかに増加する。バンドギャップ直上のエネルギーにおける光吸収係数は小さく、1.25eV(波長約 $1\mu\text{m}$ )において $\alpha=100\text{cm}^{-1}$ にすぎず、シリコン中を $1/\alpha=0.01\text{cm}$ も進入する

### シリコンの特性と限界

シリコンは**間接遷移型**であるため、**直接遷移型**であるガリウムヒ素などに比べて光吸収係数が小さく、十分な厚みのある結晶でないと光を電気に変えることができない。

## 75%のシェアを誇る 結晶系シリコン太陽電池②

### 結晶系シリコン太陽電池セルの製造工程

単結晶でも多結晶であっても、太陽電池セルの製造工程に大きな違いはありません。第1章において、「pn接合ダイオードはp型半導体にn型半導体を重ねてつくる」と書きましたが、実際の作製法はそうではありません。

図1は結晶系シリコン太陽電池の製造工程をフローチャートの形に表した図です。p型のシリコンインゴットをスライスしたウェハーに、n型をつくる不純物(ドナー)を高密度に添加(ドーピング)し、温度を上げて不純物を拡散させ、p型をつくる不純物(アクセプタ)の密度より高くすることによって、表面付近を実効的にn型にして、pn接合をつくる方法がとられます。

### 光で注入されるのは少数キャリア:太陽電池は少数キャリアデバイス

図2は、結晶系シリコン太陽電池の断面です。上記のように、太陽電池の大部分はp型です。光はp層の全体にわたって浸透し、価電子帯の電子を伝導帯に励起します。これによって、伝導帯の電子と価電子帯のホールが生成されますが、ホールはp型領域の多数キャリアなので、光でわずかに増えても誤差の範囲です。これに対して、電子はもともとp型領域には存在しない少数キャリアですから、余分のキャリアとして増加します。このことを「光によって少数キャリアが注入された」と表現します。

余分の少数キャリアである電子は、いつかは多数キャリアであるホールと結びついて消滅します。これを再結合といいます。再結合までの時間を少数キャリア寿命(ライフタイム)、再結合までに移動する距離を少数キャリア拡散長といいます。少数キャリアがpn接合付近に届かなければ、p型領域で光によってできたキャリアは光起電力に寄与しないので、太陽電池は少数キャリア拡散長より厚くなければなりません。



- 結晶系シリコン太陽電池は少数キャリアを用いるデバイスである
- 少数キャリア拡散長が太陽電池の効率を決める

図1 結晶系シリコン太陽電池の製造工程

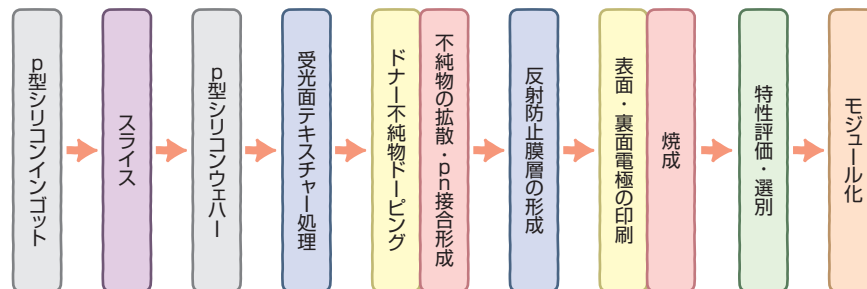
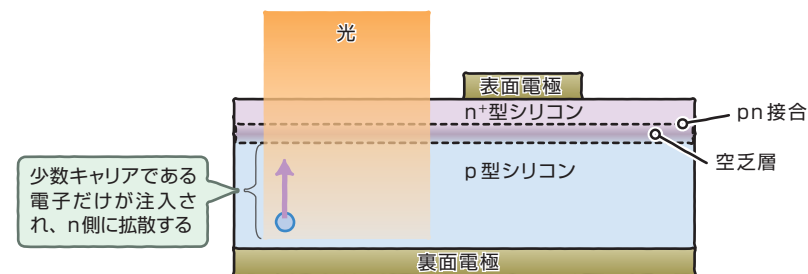


図2 結晶系シリコン太陽電池の断面



結晶系シリコン太陽電池は、p型シリコン基板の上に多量のドナーを添加し、表面を高濃度のn<sup>+</sup>層にしてpn接合をつくっている。光は、n<sup>+</sup>層、空乏層を透過して、p型領域全体に進入する。p型領域では、少数キャリアである電子が余分のキャリアとなってpn接合界面まで拡散し、空乏層の内蔵電位差によって表面電極まで引き寄せられて光起電力に寄与する

### 用語解説

多数キャリア、少数キャリア → 半導体中のおもなキャリア(n型では電子、p型ではホール)を多数キャリアと呼ぶ。これに対してn型領域にあるホール、p型領域にある電子は少数キャリアと呼ぶ。少数キャリアは、多数キャリアに取り囲まれているため、ある時間がたつと多数キャリアと再結合して消滅する。この時間を寿命(ライフタイム)と呼ぶ

## 結晶系シリコンの変換効率チャンピオン 単結晶系シリコン太陽電池

結晶系シリコンの太陽電池のうち、単結晶シリコンを使ったものは、(008)で述べたように、1953年にベル研究所で開発されました。それ以来、着実に研究開発が進み、もっとも信頼性のある太陽電池になりました。単結晶シリコン太陽電池の効率競争がもっとも盛んだったのは、1990年代でした。第2章で述べたさまざまな要素技術(反射防止膜、テキスチャー、パシベーションなど)を組み合わせることによって、セル変換効率はベル研究所の最初のセルの10倍近い24.5%に達し、モジュール効率も23%近くまで上がりました。

表1には、1990年代に開発されたシリコン系太陽電池のチャンピオンデータを比較して示してあります。セル変換効率24.5%、モジュール効率22.7%というチャンピオンデータをだしたニューサウスウェールズ大学(USNW)のセルは、高品位の**FZ単結晶**を用いたもので、図1に示すような構造をもち、**PERL**(Passivated-Emitter, Rear-Localized)と名づけられました。またUNSWでは、**CZ単結晶**を用いた45.7cm<sup>2</sup>の大面积セルで、21.6%の変換効率をだしています。FZ法、CZ法の詳細は第2章の(019)で述べました。

表1には、鑄造(キャスト)法で作製した**多結晶**のセルおよびモジュールの効率も掲げています。鑄造法でも小面積セルでは20%近い変換効率が報告されていますが、100cm<sup>2</sup>を超える大面积セルでは17%台にしかありません。多結晶の場合、モジュールにしたときの変換効率は面積0.1m<sup>2</sup>のもので15%程度です。

21世紀になると、低コスト化が最大の関心事となり、変換効率競争は影をひそめました。単結晶シリコン太陽電池において、いまだに1990年代のものがチャンピオンデータというのは、残念なことです。



- 変換効率最大の単結晶シリコン太陽電池はFZ結晶でつくられた
- 太陽電池モジュール効率はセル効率に比べかなり低い

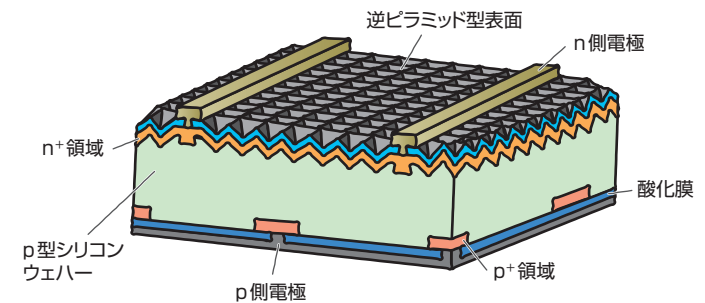
表1 結晶系シリコン太陽電池セルおよび太陽電池モジュールの変換効率(1990年代)

種類	材料	変換効率(%)	面積(cm <sup>2</sup> )	研究機関
セル	FZ単結晶	24.5	4.0	UNSW*(豪)
		22.6	4.0	日立(日)
	CZ単結晶	21.6	45.7	UNSW*(豪)
	鑄造(キャスト)多結晶	19.8	1.0	UNSW*(豪)
		17.2	100	シャープ(日)
モジュール	FZ単結晶	22.7	778	UNSW*(豪)
	鑄造多結晶	15.3	1017	Sandia(米)

\*ニューサウスウェールズ大学

(出典: T.Saito et al.:Prog. Photovoltaics 1, pp.11-23 (1993))

図1 ニューサウスウェールズ大学で開発されたPERLセルの構造



PERLセルの構造は、高品質のp型シリコンウェハーを使って、表面を逆ピラミッド形のテキスチャー構造に加工し、その上に反射防止膜を堆積したもの。シリコンの表面と裏面には薄い酸化膜を形成して表面再結合損失を防いでいる。酸化膜の表面に小さな孔(ピア)を設け、電極部分とシリコンの接触面積を減らしている。裏面側は高濃度p+領域を設け、電気抵抗を減らしている

## 効率は単結晶より落ちるが 低コストの多結晶シリコン太陽電池

### 鑄造(キャスト)多結晶シリコンは大量生産が可能

多結晶シリコンのインゴットは、るつぼ(鑄型)でシリコンを融解し、融液を底部から上部に向かって固化(direct freezing)させる方法、あるいは図1に模式的に示すように、成長用のるつぼに別のるつぼから融液を注ぎ込んで成長させる方法によって鑄造されます(くわしくは第2章(020)を参照)。鑄造法では、単結晶成長と同程度の時間内に単結晶インゴットの10倍近い数百kgもの多結晶インゴットが得られるので、生産性が高く、エネルギー消費が低いという優位性があります(宇佐美徳隆:応用物理学会結晶工学分科会第133回研究会テキストp.43(2010.7)より)。

### 多結晶シリコンはトランジスタに向かないが、太陽電池には使える

図2は、多結晶シリコンのインゴットを模式的に描いたものです。多結晶インゴットは、多数の結晶粒がぎっしりと詰まって互いに接しています。結晶粒の中には単結晶と同じ規則性をもっています。結晶粒と結晶粒の境目のことを結晶粒界、または粒界といいます。

図3の(a)に示すように、トランジスタやLSIなどの電子デバイスでは、面内でキャリアを動かすので、粒界がキャリアの動きを妨げることがないように単結晶を使わなくてはなりません。一方、太陽電池では(b)のように、結晶粒に垂直にキャリアを流すので、粒界があっても太陽電池の光起電力にあまり大きな影響をもたらしません。多結晶系は低コストで、比較的高い効率が得られるので普及しています。もちろん、粒界付近には結合の切れ目(ダングリグボンド)があって、キャリアを捕らえて解放しなかったり、粒界を通してリーク電流が流れたりするので、パシベーション技術(第6章(077)を参照)で修復します。



- 多結晶シリコンは鑄造法など低コスト・省エネルギーで製造できる
- 多結晶シリコンは、電子デバイスに向かないが太陽電池には使える

図1 太陽電池用多結晶シリコンはシリコンの鑄物

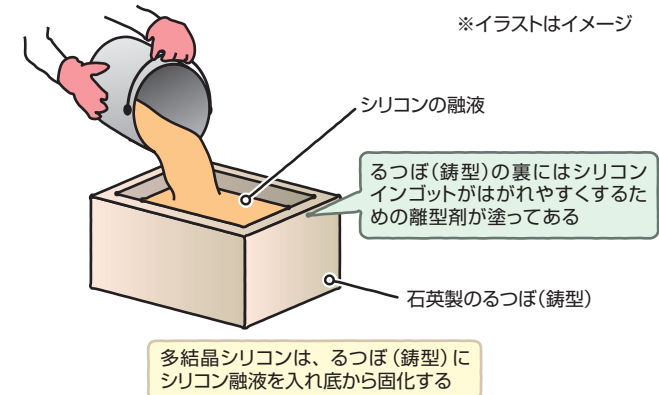


図2 多結晶シリコンの結晶粒と粒界

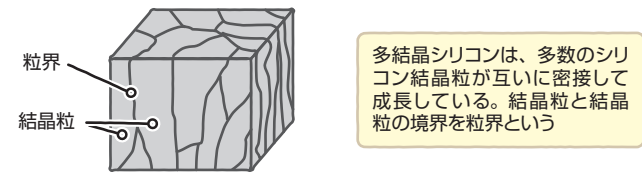
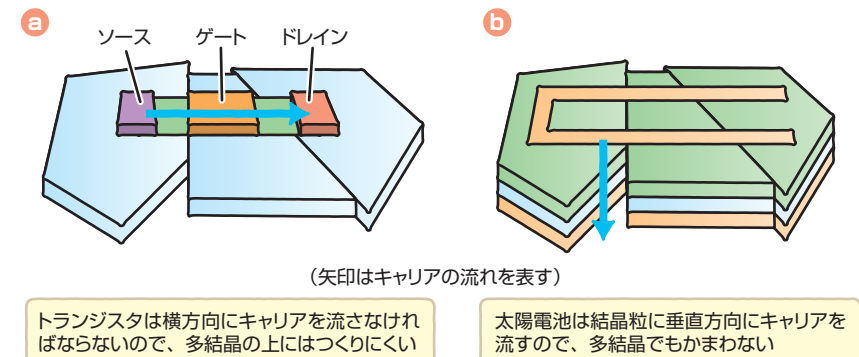


図3 多結晶はトランジスタに向かないが、太陽電池には使える





## 低効率でも材料コストが安い 薄膜シリコン太陽電池①

### シリコン材料は需給がひっ迫

昨今の太陽電池ブームにより、シリコンインゴットの需給がひっ迫するようになってきました。材料が少なくても薄膜太陽電池の普及が望まれますが、結晶系シリコン太陽電池は光吸収が弱いので、100~300 $\mu\text{m}$ の厚みがないと入射した光の全部を利用できません。シリコン太陽電池の薄膜化はできるのでしょうか？ 同じシリコン系でも、(039)の図1に示したように、水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)は、バンドギャップ(1.7eV)直上の2.0eVにおいて $10^4\text{cm}^{-1}$ を超える吸収係数を持っており、薄膜太陽電池をつくることができます。図1に示すソーラー電卓に用いられる太陽電池の材料は、アモルファスシリコンです。

### 水素化アモルファスシリコン薄膜とは

結晶シリコンの原子配列とアモルファスシリコンの原子配列の違いを、図2に示します。シリコン原子の近くだけを見ると、(a)の結晶シリコンでも(b)のアモルファスシリコンでも、4本の結合手をだしています(これを4配位という)。

結晶シリコンは、(a)に示した単位胞(ダイヤモンド構造)が周期的に繰り返される、長距離にわたる規則性(長距離秩序)をもっています。しかし、アモルファスシリコンでは、結合手の長さや角度にゆらぎがあるために、長距離秩序を失い、4配位を保てなくなって、3配位のシリコンが現れます。(b)の点線の部分には原子がなく、余った1つの電子はブラブラしています。これを「ダングリングボンド」(未結合手)といいます。これがあると、不純物を添加してもドナーやアクセプタになりません。シランガスをグロー放電法で分解して作製した水素化アモルファスシリコンは、図2の(b)に示すように、未結合手の大部分が水素と結合して無力化するため、添加した不純物がドナーやアクセプタとして働き、実用的なデバイスができたのです。



- アモルファスシリコンは吸収係数が高く、薄膜太陽電池の材料となる
- 未結合手を水素終端することで、p型、n型を実現できた

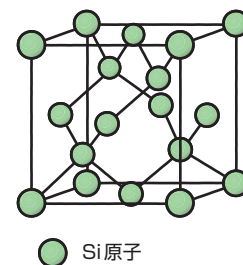
図1 ソーラー電卓の太陽電池はアモルファスシリコン薄膜



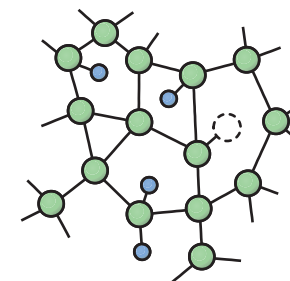
図2 結晶シリコンと水素化アモルファスシリコンの原子配列の比較

#### a 結晶シリコンの単位胞

(ダイヤモンド構造)



#### b 水素化アモルファスシリコン



(単位胞：結晶における原子配列の繰り返し単位)

結晶もアモルファスも、近距離の結合は4配位であるが、結晶では、原子と原子の結合手の長さや結合の角度は一定で、単位胞の構造が周期的に繰り返されるのに対し、アモルファスでは、結合手の長さや角度に揺らぎがあり、周期性がなく、ところどころで4配位を保てなくなって、未結合手が生じている

#### 水素化アモルファスシリコンの歴史

アモルファスシリコンの研究は、1960年代から行われていましたが、真空蒸着、スパッタ法などの方法ではn型やp型ができず、太陽電池などpn接合デバイスをつくることができませんでした。1975年、英国の科学者スピーアとルコンバーは、シランガス( $\text{SiH}_4$ )を放電によって分解して堆積する方法を用いて、アモルファスシリコンのpn接合を作製することに成功し、ホスフィン( $\text{PH}_3$ )を混ぜることでn型を、ジボラン( $\text{B}_2\text{H}_6$ )を混ぜることでp型を実現しました。この方法でp型、n型を実現できたのは、未結合手がシランに含まれる水素によって終端されたことが原因であることも明らかにしました。

## 低効率でも材料コストが安い 薄膜シリコン太陽電池②

### アモルファスシリコン薄膜太陽電池はpn接合ではなく pin 接合

水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) 薄膜太陽電池は、結晶系シリコン太陽電池と違って少数キャリアの拡散を用いませぬ。アモルファスシリコンのpn接合は、結晶シリコンのような良好なダイオード特性が得られません。この理由は、不純物を添加してn型やp型にしたアモルファスシリコンは、無添加のものに比べて品質が劣り、未結合手がキャリアを捕まえて離さなかったり、キャリアが未結合手の間を飛び移って移動して接合をショートしてしまったりするためです。これを防ぐために、**図1**の断面図に示すように、p層とn層の間に無添加で品質のよいi層(iはintrinsic: 真性の略)を挿入します。i層で発生した光キャリアのうち、ホールはp層とi層の界面にできた内蔵電位差(011参照)を使ってp層側に集め、電子はi層とn層の界面に生じる内蔵電位差を使ってn層側に集めることで、電子とホール効率的に分離させています。

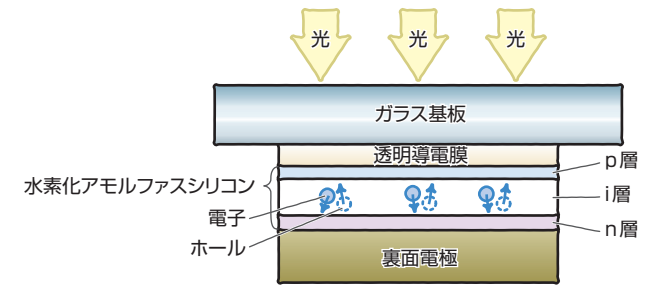
### アモルファスシリコンの光吸収は結晶系シリコンより強い

**図2**は、アモルファスシリコンの光吸収スペクトルを模式的に表したものです。図の中に書き込んだ小さな図は、A付近の吸収係数のタウツ・プロットと呼ばれるグラフで、直線部分がゼロを横切る位置からバンドギャップ $E_0$ が得られます。アモルファスシリコンの $E_0$ は、結晶系シリコンの1.1eVより高い1.7eVです。1.7eVに相当する光の波長(約730nm)より波長の長い光は透過するので、アモルファスシリコンの薄膜は赤く見えるのです。光吸収スペクトルの立ち上がり方は結晶シリコンより急峻なので、数 $\mu\text{m}$ の厚さの膜でも十分光を吸収します。したがって、結晶系の1/10~1/100の厚さでよいので省資源です。また、第2章の(021)に述べたように、薄膜は大面積のガラス基板に堆積できるので、生産性が高く低コストになります。



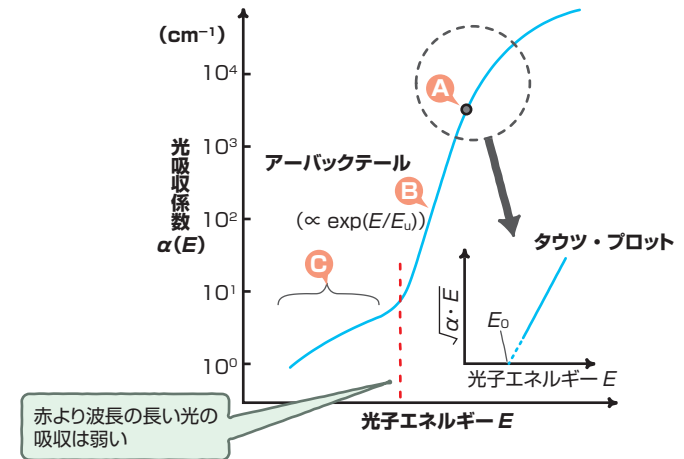
- アモルファスシリコン太陽電池はpin構造をとる
- アモルファスシリコンは光吸収の立ち上がりが急峻なので薄膜でOK

図1 水素化アモルファスシリコン薄膜太陽電池の構造



薄膜シリコン太陽電池は、透明導電膜を付けたガラス基板にp層、i層、n層、裏面電極の順にアモルファスシリコン薄膜を堆積した構造となっている

図2 アモルファスシリコンの光吸収スペクトル



- ・Aの付近を挿入図のようにプロットし直すとバンドギャップ $E_0$ が求められる。光学的に求めたので「光学バンドギャップ」と呼ぶ(アモルファスシリコンの $E_0$ は約1.7eV)
- ・B付近は、原子配列の乱れにもとづく指数関数的なすそを引いている(アーバックテールと呼ばれる)
- ・Cあたりの吸収は、アモルファス特有のギャップ内状態による

挿入図は、光吸収係数 $\alpha$ と光子エネルギー $E$ の積の平方根を光子エネルギー $E$ に対して描いた「タウツ・プロット」というグラフ。直線部分を延ばして0を横切るエネルギーがバンドギャップ $E_0$ になる