

光を無駄なく吸収する太陽電池 理論効率 は従来型の2倍以上

再生可能エネルギーによる発電で 化石燃料の消費を抑制する

現代の快適な生活を支えている電氣。だが、石炭や天然ガスを使う発電所は温室効果ガスの主要な排出源でもある。排出量を減らすには、化石燃料由来エネルギーではなく、再生可能エネルギーを利用する必要がある。

さまざまな再生可能エネルギーの中で確実に普及しているのが太陽電池だ。水力や風力などの再生可能エネルギーと比べて、設置場所やスペースなどに制約がそれほどないのも特徴。分散型発電装置としての潜在性は高い。

2020年に変換効率40%を目指す

だが、潜在性だけで爆発的な普及が見込めるほど甘い世界ではない。技術面での最重要課題といえるのがコスト・パフォーマンスだ。発電装置であれば、コスト・パフォーマンスの指標

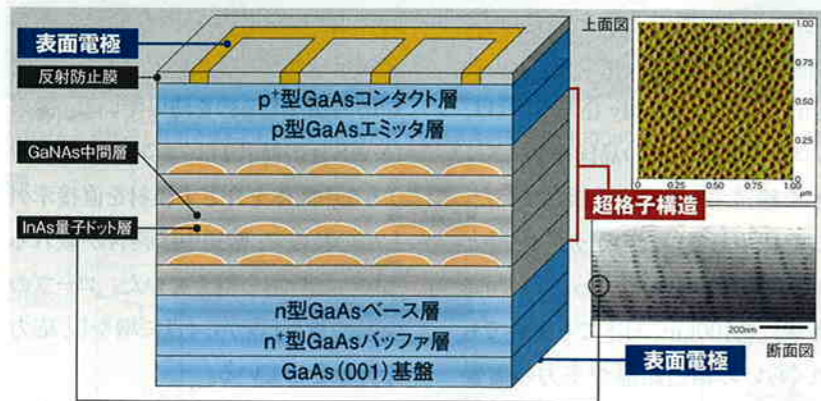


図1●量子ドット型太陽電池の構造
量子ドット型には複数の種類がある。3次元超格子構造でマルチバンドを形成するものはその一つ。筑波大学の資料を基に本誌が作成した。3-5族半導体を使うのは、元素の組み合わせが豊富で改良しやすいという狙いもある。

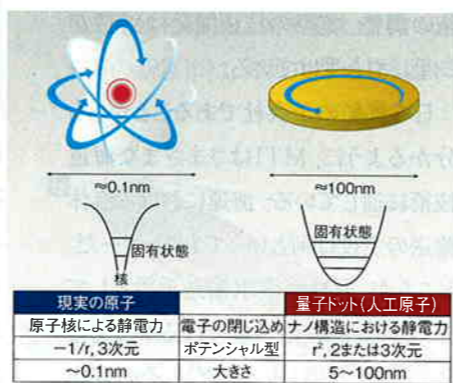


図2●量子ドットの特徴
量子ドットのような微細造物は、内部に電子を閉じ込められるため、人工の原子ともいえる。筑波大学の資料を基に本誌が作成した。

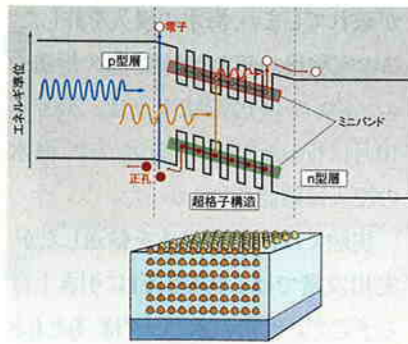


図3●ミニバンドの形成
p型層とn型層の間にミニバンドが形成されると、長波長の(エネルギーが低い)光を有効利用できる。青色の矢印はエネルギーが高い光、赤色の矢印はエネルギーが低い光を示している。筑波大学の資料を基に本誌が作成した。

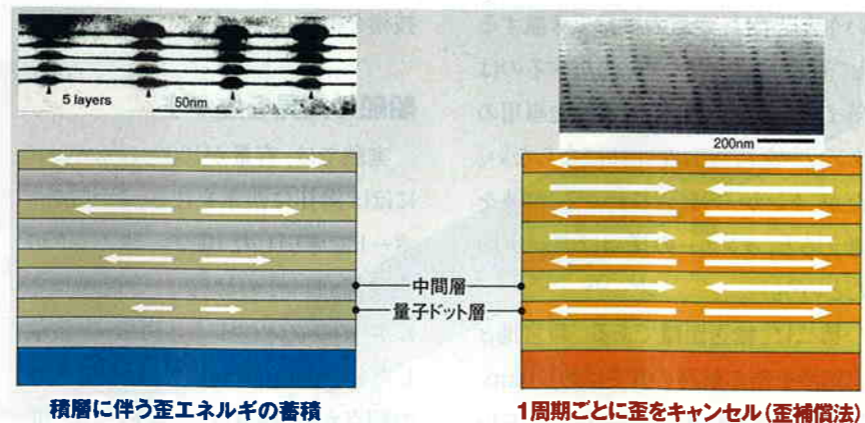


図4●歪補償法
歪エネルギーをキャンセルするように重ねていく。現在は、研究室の設備の制約上、真空蒸着で結晶成長させているが、ガスソースによる分子線エピタキシー法を使えば量産の可能性も見えてくるという。筑波大学の資料を基に本誌が作成した。

は単位発電量(kWh)当たりのコストとなる。火力発電や原子力発電と比べて、太陽電池はまだ高い。これを下げるには、分子(コスト)を小さくするか、分母(発電量)を大きくするかのどちらか(または両方)が必要になる。

特に太陽電池の場合、セルの面積を拡大して発電量を増やしても、本当の意味でコスト・パフォーマンスを改善したことになる。そこで「変換効率」という概念が出てくる。変換効率とは、セルから取り出せる単位面積当たりの最大電力を、同じく単位面積当たりの太陽光エネルギーで除した値。太陽光発電の性能は、この値でほぼ決まる。

こうした状況で注目されているのが、既存の太陽電池をゆうに上回る変換効率の新世代太陽電池。その中でも有望視されているのが「量子ドット型」と呼ばれる方式だ。理論変換効率は60%超。一般的な単結晶シリコン型の2倍以上である。

この量子ドット型太陽電池が最近、話題を集めた。筑波大学大学院数理工学物質科学研究科準教授の岡田至崇氏らのグループが、2007年の時点で世界最高と見られる変換効率を実現したからである。試作したセルは数cm角で、変換効率は8.5%。理論効率には今のところ全く及ばないが、今後は半導体メーカーなどと協力して研究を進めることで、2020年までに変換効率を40%に高められると同氏は言う*。

ミニバンドを形成

岡田氏らの太陽電池の構造を図1に示す。p型層とn型層の間に量子ドット層と中間層を交互に積層(図1)。この

量子ドット層の存在こそが変換効率を高めるための秘訣だ。一般的な単結晶シリコン型では、p型層とn型層を直接結合していることが多い。

量子ドット層(と中間層)を設けるとなぜ変換効率が高まるのか。このことを説明するには、太陽光発電の原理にさかのぼる必要がある。太陽電池に電流が流れるのは、太陽光エネルギーによって半導体中の電子が励起されて、電子のエネルギー準位が価電子帯から伝導帯に持ち上げられ、物理的に移動可能になるから。この電子がn型層の電極に移動することで電流が流れる。そこでは、半導体の価電子帯と伝導帯のエネルギー差(バンドギャップ)以上の太陽光エネルギーだけが発電に使われている。逆に言えば、それ以外の太陽光エネルギーは使われていない。太陽光は、幅広い波長の光の集合体なので、どれだけ多くの光を発電に利用できるかが理論変換効率に効いてくる。

相対的にエネルギーの小さい(波長の長い)太陽光も利用するには、価電子帯と伝導帯の間に別のバンド(ミニバンド)が必要だ。エネルギーの大きい光は電子を価電子帯から伝導帯へと励起するのに使い、エネルギーの小さい光は電子を価電子帯からミニバンドへ、またはミニバンドから伝導帯へと持ち上げるのに使う。量子ドット層は、このミニバンドを形成するための構造だ。

量子ドットは、大きさが5~100nmと非常に微小な構造物であるため、原子と同じように静電力で電子を閉じこめられる(図2)。この量子ドットを微小な間隔で並べていくと、半導体の結晶と同様、隣り合う量子ドットが電子軌道

を共有するので、超格子構造中にミニバンドが形成される(図3)。

100層の量子ドットを重ねる

ここで問題になるのが、量子ドットのような微細かつ複雑な3次元形状の構造物をいかに積層していくかということ。岡田氏は結晶成長で挑んでいる。同氏は昔も今も結晶成長の専門家であり、量子ドット技術を高性能半導体レーザーに適用していた。それを太陽電池にも応用しているわけだ。半導体レーザーと太陽電池の違いは、前者は量子ドットを積層する必要はないが、後者はそれをやらなければならないことである。

量子ドット形成のために同氏が採用した理論は「自己組織化結晶成長」と呼ばれるものだ。基板よりも格子定数(結晶の原子間距離)が大きい物質を結晶成長させると、結晶に歪エネルギーが蓄積され、結晶表面上に自然に量子ドットが形成される。

ただし、単純に何層も重ねていくと歪エネルギーが拡散していくので、量子ドットの大きさがそろわない。そこで、中間層には量子ドット層の歪エネルギーを打ち消すような材料を選び、各層で歪エネルギーをキャンセルする「歪補償法」を採用した(図4)。量子ドット積層における目標は、高さが1μmの超格子構造に高さが10nmの量子ドットを100層重ねることである。なぜなら、太陽光を吸収しきるのに最適な厚さが1μmであり(それ以上はむしろ抵抗になる)、トンネル効果の見込めるミニバンドを量子ドットが形成するための条件は、高さ(隣り合う量子ドット同士の間隔)が10nm以下だからである。

* 岡田氏らのグループ以外にも量子ドット型太陽電池の研究に取り組んでいるグループは世界中に多数いる。