

環境調和型ハイブリッド光エネルギー変換材料

「変換と制御」領域 伊原 学

要 旨

本研究では、新しい環境調和型ハイブリッド光エネルギー変換材料の開発を行った。主な成果は、Ⅰ. Si 薄膜の ZMC 法による結晶配向メカニズムの解明と SiO₂ 上への Si 単結晶薄膜の作製、Ⅱ. β -FeSi₂ 半導体薄膜の ZMC 法による作製、Ⅲ. 金属ナノ粒子の局所電場増強効果による色素増感太陽電池の光電流の増大である。

1 研究のねらい

光エネルギー変換材料を用いたデバイスである太陽電池は、排ガスの生成が全くなくクリーンな発電システムとして知られている。また、太陽電池作成時のエネルギー使用を考慮しても単位発電量あたりに放出する全二酸化炭素放出量は十分に少なく、地球温暖化抑制技術として大きな役割を果たすことが期待できる。しかし、現在までに太陽電池が住宅などの分散型発電システムとしてあまり普及していない最大の原因の一つに高い製造コストが挙げられる。低コストプロセスの導入や高効率化による発電量あたりの低コスト化などが必要である。現在までに様々な種類の材料における研究が行われてきたが、従来からの作製手法を用いた単一の材料では目的とする物性を有する材料開発は困難な状況となっている。そこで、新たな作製手法の提案および新たな発想に基づく材料設計が求められている。また、光エネルギー変換材料の本格的な普及を考慮すると十分な資源量があり、毒性がなく、たとえ流出しても環境への影響が少ない環境調和型の材料で構成されている必要がある。

太陽電池の効率は主に光吸収過程の効率とその過程により生成した電子とホールとの移動効率によって決定される。光エネルギー変換材料に求められる物性としては、①適切な領域に光吸収領域を持つ、②光吸収係数が十分に高い、③電子やホールとの移動度が高い、④欠陥が少なく電子とホールとの再結合速度が低い、ことが挙げられる。①、②が光吸収過程の効率に関連し、③、④が生成した電子とホールとの移動効率に関係する。

本研究では、環境調和型の材料を用いて上記 4 つの条件を満たす材料を開発するため

に新しい作製手法と新しい材料設計との観点から大きく2つのアプローチを行った。

1. これまでに我々が低コストな太陽電池用 Si 薄膜の欠陥低減手法として新しく開発した ZMC 法(図1に概念図を示す。)を用いて、さらに Si の低欠陥化を実現する。また、

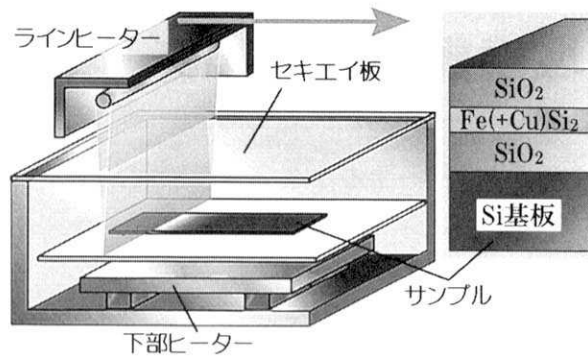


図1 ZMC 装置の概略図

①, ②に特徴的な材料を薄膜にし、

結晶欠陥を劇的に減少させることで④を向上させ、③の欠点を補う。具体的には以下のような課題に取り組んだ。

I. Si 薄膜の ZMC 法による結晶配向メカニズムの解明と Si 単結晶薄膜の作製

II. β -FeSi₂ 半導体薄膜の ZMC 法による作製

2. 光吸収過程に必要とされる物性である①, ②と電子、ホール移動過程に必要とされる物性である③とを異種の材料で分担することができるハイブリッド材料を検討した。ハイブリッド材料における光吸収物質の光吸収過程を局所電場増強効果という物理効果を使って向上させ、光電流の向上による高効率化を目的とした。色素増感太陽電池は光吸収層に可視光を吸収する物質として色素を、電荷を移動する物質として TiO₂ を使ったハイブリッド材料である。そこで、下記のような課題に取り組んだ。

III. 金属ナノ粒子の局所電場増強効果による色素増感太陽電池の光電流の増加

局所電場増強効果により光電流を増大させることができることが明らかになれば、異種の半導体のハイブリッド材料への応用も期待できるようになる。

2 研究成果

I. Si 薄膜の ZMC 法による結晶配向メカニズムの解明と SiO₂ 上 Si 単結晶薄膜の作製

我々が開発した ZMC (zone melting crystallization) 法では ZMC 後、発電層となる Si 薄膜と基板を剥離して太陽電池を作製するため高価なシリコン wafer の使用量を低く抑えることが可能である。従って、ZMC 法によって欠陥の少ない薄膜を作製することができれば低コスト高効率太陽電池の作製が期待でき、現在、半導体業界で大きな問題となっているシリコン原料不足にも対応できる。ZMC 後の結晶の配向性は試料面に対して法線方向(ND)に

対して(001)に強く配向し、ND と垂直な方向 (TD) でも配向させることが出来ればより単結晶に近い低欠陥なシリコン薄膜が作製でき、太陽電池としてだけでなく、SOI(Silicon On Insulator)基板としての利用にも用途の広がり期待できる。ここでは結晶配向性の制御により単結晶に近い低欠陥なシリコン薄膜の作製を目指し、ND と垂直な方向(TD) での配向メカニズムの解明を目的とし、ZMC 膜の結晶配向性を OIM(Orientation Imaging Microscope)で調べて検討した内容について述べる。

【実験】基板として、厚さ $725\mu\text{m}$ の 4° OFF (100) Si Wafer を用いた。三層構造を Wafer 上に (SiO_2 膜/a-Si 膜/ SiO_2 膜) を作製した。a-Si はマグネトロン R.F スパッタリング法により、 SiO_2 薄膜は基板加熱型の Cold Wall CVD 法により、テトラエトキシシラン (TEOS) を熱分解させて成膜した。成膜温度は 800°C とした。下記に示す 2 種類の方法で結晶化を行った。1.ランプヒーターの走査速度を 2mm/s とし、通常の走査による ZMC により結晶化を行った。2.三層膜の一部を ZMC 装置のランプヒーターを用いて線状に熔融させ、その後すぐにランプヒーターの電源を切り固化させた。得られた Si 膜の結晶配向性を OIM によって評価し、比較した。

【結果および考察】

図 2 に OIM による逆極点図方位マップの色と試料面に対する方向の関係を示す。それぞれの色がそれぞれの結晶面方位に対応する。

図 3 に ZMC のランプヒーターの走査を 2mm/s で行った ZMC 膜 (SiO_2 膜/a-Si

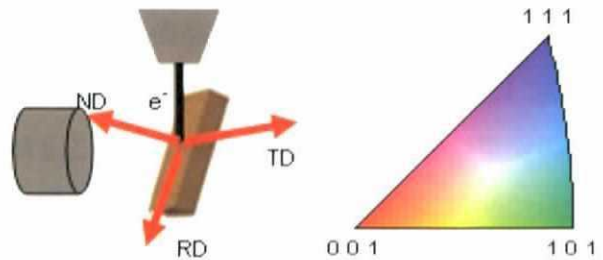


図 2 OIM による逆極点図方位マップの色と試料面に対する方向の関係：(a)ND 方向 (b)TD 方向

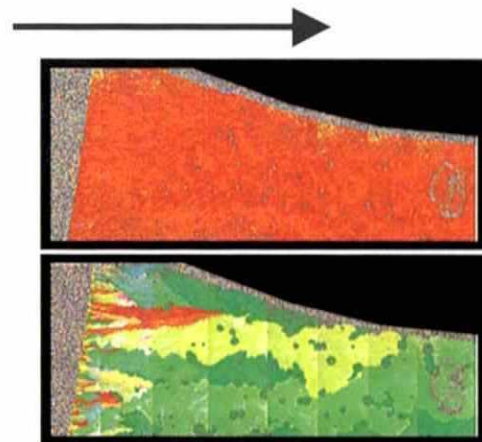


図 3 走査速度を 2mm/s で作製した ZMC 膜の OIM 像：(上)ND 方向、(下)TD

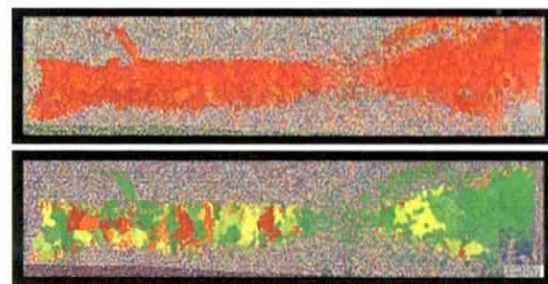


図 4 ZMC のランプヒーターの走査を行わずに線状に熔融後、固化させた薄膜の OIM 像：(上)ND 方向、(下)TD 方向

膜/SiO₂膜)のOIMによる逆極点図方位マップを示す。これらの図から2mm/sで走査したサンプルのND方向では(001)に強く配向していることが分かる。また、TD方向では別の方位が現われても途中で方位が均一化することが分かった。

図4にZMCのランプヒーターの走査を行わず、ライン状に熔融させ固化させたサンプルの逆極点図方位マップを示す。これらのサンプルでもND方向では走査させたものと同様に(001)に強く配向した。一方、TD方向では結晶面方位は一様ではなかった。

以上のことからND方向の結晶面方位はSiO₂との界面の安定性に起因していて、TD方向はZMCによって走査することで、特定の配向を示すことがわかった。つまり、SiとSiO₂の界面の安定性を使って配向を制御できることになる。

さらに検討した結果、ある条件下で広い面積で粒界のない単結晶シリコン薄膜が形成できることがわかった。この薄膜のさらなる高結晶化を行い高効率シリコン薄膜太陽電池の作製を行うことができれば、低コスト高効率シリコン太陽電池として実用化が大いに期待できる。これは界面の安定性を利用した新しい成長機構によって単結晶化が可能であることを示したもので他の材料への波及効果も期待できる。

II. 薄膜ゾーンメルティング法による β -FeSi₂薄膜の作製

本研究では太陽電池の発電コスト削減に向け、現在まだ実用化されていない薄膜結晶型太陽電池の開発を目指した。半導体材料として本研究の対象としたのは β 型鉄シリサイド(β -FeSi₂)である。数あるFe-Si系化合物の中で唯一の半導体相である β -FeSi₂は資源供給性と安全性に優れ、特にSiと比較してバンドギャップが0.83-0.85eVと小さいため近赤外領域でのキャリア生成が期待でき、かつ波長によってはSiの約100倍に相当する高い光吸収係数を有するという性質は、薄膜結晶型太陽電池として有利な性質であると言えよう。また非常に複雑な構造であるが故に歪や格子欠陥が導入されやすく、これが β -FeSi₂の光学物性に大きく影響するとも言われている。従って太陽電池への利用を考え、粒界などのキャリア散乱/再結合因子の少ない大きな結晶粒から成り、かつ結晶内で歪や格子欠陥が最適に制御された薄膜を作成することを目的とした。

β -FeSi₂は940℃以上で金属相である α -FeSi₂に転移してしまうため、残念ながらZMC法を利用して直接結晶薄膜を作成することは難しい。しかし、 α -FeSi₂であれば、融液から直接作成することが可能となる。そこで本研究では、FeSi₂アモルファス薄膜に対してZMC処理を行うことで、 α -FeSi₂の低欠陥薄膜をまず作製し、次いでこれをアニールにより半導体転移させるという新たな手法での β -FeSi₂薄膜の製膜を試みた。

【実験】 ZMC 処理用のサンプルは、Fe と Si から成る層が上下 2 枚の SiO₂ 層に挟まれた三層構造となるよう作製した。基板は Si ウエハーとし、製膜には RF マグネトロンスパッタリング法を利用して、室温下、Fe-Si 層は約 0.3~0.5 μm、SiO₂ 層は 1~2 μm まで堆積させた。薄膜 ZMC 法とは図 1 に示すように、下部ヒーターで予備加熱したサンプル上でラインヒーターを走査し、試料層である薄膜のみを順次帯状に熔融固化させる手法である。本研究では、予備加熱温度を約 1000℃、走査速度を 1mm/s に設定し窒素雰囲気中で処理を行った。

【結果および考察】

図 5 に、Fe:Si=1:2 の仕込み比率で作成したスパッタ膜 (ICP により見積もった組成は Fe:Si=1:1.98、以下 FeSi_{1.98} と表記) と、ZMC 炉中で 10 分間の予備加熱のみ行った FeSi_{1.98} 膜 (ZMC 処理直前の膜)、および ZMC 処理後の膜の XRD パターンを示した。

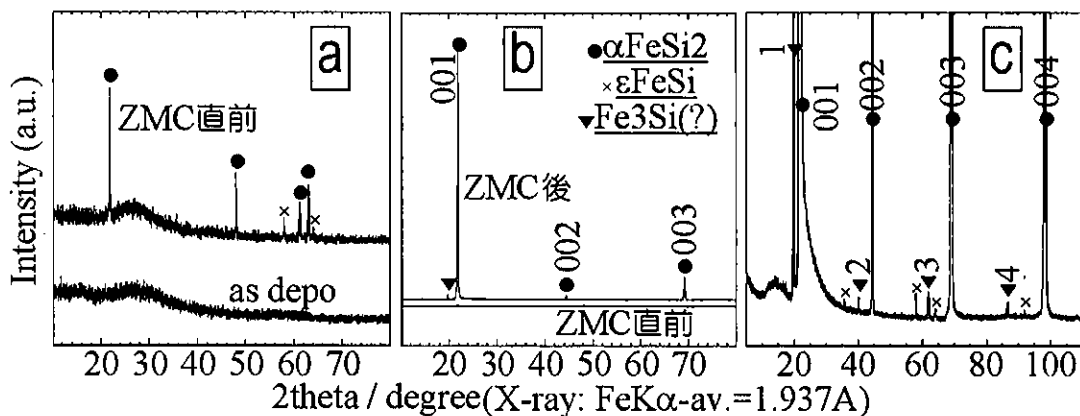


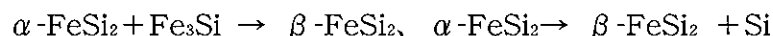
図 5 FeSi_{1.98} のスパッタ膜と ZMC 直前の膜の XRD パターンの比較 (a)、ZMC 直前と ZMC 後の膜の XRD パターンの比較 (b)、及び ZMC 後の膜の XRD パターンの拡大 (c)

ZMC 直前には α-FeSi₂ と ε-FeSi の無配向な多結晶体を微小に含んだ状態 (図 5a) であったものが、ZMC 処理によって、極めて強い c 軸配向を有する α-FeSi₂ から成る膜 (図 5b) へと変化したことがわかる。XRD パターンから結晶の一次粒子径を見積もったところ、ZMC 膜中の α-FeSi₂ は、膜厚の 80% 程度まで c 軸方向に成長した状態となっていることが示唆された。α-FeSi₂ の構造を c 軸に垂直な方向から眺めてみた場合、Fe のみから成る層と Si のみから成る層が c 軸に対して規則的に積層した層状構造とみなすことが出来る。従って ZMC 膜中では、上下 SiO₂ 層との界面に Fe 層か Si 層のいずれかが形成されていることになり、ZMC 膜での非常に強い配向性は、このどちらかの層と SiO₂ との界面が非常に安定であることに起因しているのではないかと考えられる。一方、ZMC 膜

の XRD パターンを拡大して示した図 5c からは、 α -FeSi₂ の 001 ピークの他にも幾つかピークが現れていることがわかる。この内 1~4 の番号で示した一連のピークは、面間隔から見積もって、強磁性体相である Fe₃Si の h00 面に由来するピークではないかと思われる。もしこれが Fe₃Si 由来である場合、ZMC 膜は極めて強い c 軸配向を持つ α -FeSi₂ と、微小とはいえ極めて高い a 軸配向を持つ Fe₃Si から成る、高配向「金属/強磁性体複合膜」というべき興味深い構造体と成っていることになる。Fe-Si 系の相図によれば、Fe₃Si は α -FeSi₂ との共存が許されない化合物であり、本当に α -FeSi₂ と Fe₃Si による高配向膜となっているのであれば、これは ZMC 処理時の非平衡状態下で初めて現れる特別な現象であるといえる。また図 5c ではさらに、ごく微小な無配向 ϵ -FeSi の存在が確認できた。

次にこの高配向 ZMC 膜を β 相へと転移させるため、800℃で 20 時間と、930℃で 20 時間、また 930℃で 20 時間のあとに 800℃で 20 時間という 3 種類の条件でアニール処理を行ったが、どの条件でも構造は全く変化しなかった。 α -FeSi₂ は非化学量論化合物であり、常に Si 過剰組成で安定化している。この為、融液から α 相を経て化学量論化合物である β 相が生じる際には次のような包析、又は共析型の相転過程を通ることになる。 α -FeSi₂ + ϵ -FeSi \rightarrow β -FeSi₂ (包析型)、 α -FeSi₂ \rightarrow β -FeSi₂ + Si (共析型) これまでのバルク系での研究において、少量の銅の添加によって転移速度が劇的に促進されることが報告されている。そこで、本研究で得られた高配向膜に対してもこの効果が有効に働くことを期待し、銅を添加したアモルファス薄膜 (Fe_{0.7}Cu_{0.3}) Si_{2.2} を製膜してノンドープと同様の条件で ZMC 処理を行い、次いでアニール処理を行った。(Fe_{0.7}Cu_{0.3}) Si_{2.2} に対して ZMC 処理を行った膜 (以下 Cu-ZMC 膜) はその後のアニール処理を行わない場合には、 ϵ -FeSi が存在しないということ以外、ノンドープサンプルとほぼ同様の構造を有していた。

図 6 は、30 at % Cu doped ZMC 膜へのアニール処理に伴う構造変化を示す。ノンドープ膜と異なり、アニールによって α -FeSi₂ と Fe₃Si 相が劇的に減少 (図 6a, 6b) し、930℃と 800℃での計 40 時間のアニール後には両相共に全て消え、 β -FeSi₂ と微量の Si のみが現れている (図 6c) ことが確認された。このことから、ZMC 処理で得られた高配向 α -FeSi₂ 膜は、銅による転移促進効果により、以下の包析反応と共析反応の両者を経て β -FeSi₂ へと転移したものと考えられた。



FeSi_{1.98}、及び、Fe に対して 2at% の Cu を加えた (Fe_{0.98}Cu_{0.02}) Si_{1.98} の 2 種のアモルファ

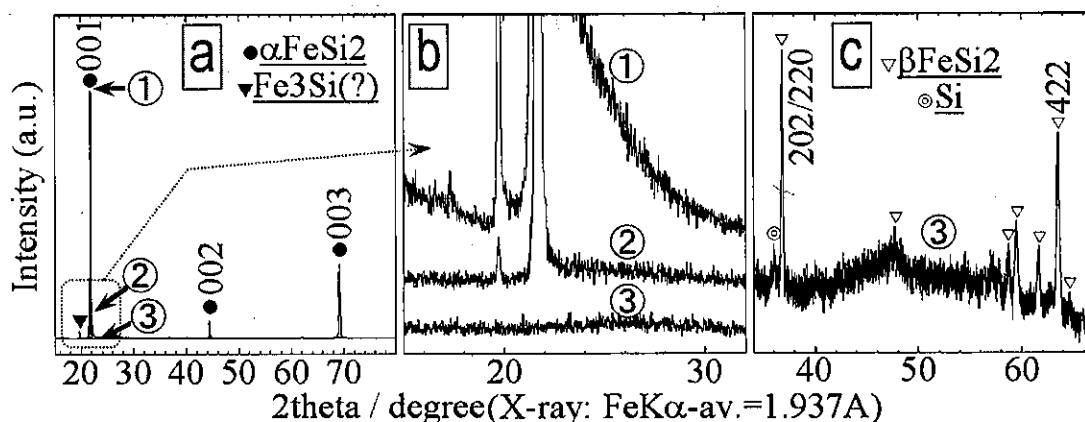


図6 (Fe_{0.7}Cu_{0.3})Si_{2.2}のZMC膜に対して行ったアニール処理に伴うXRDパターンの変化(a)とその拡大(b)、(c)及びZMC後に930℃と800℃で20時間ずつ計40時間アニールすることによって得た膜のXRDパターン。サンプル：①ZMC膜、②ZMC後930℃で20時間アニールした膜、③ZMC後930℃と800℃で20時間ずつ計40時間アニールした膜

ス膜に対して、ZMC処理を行わずに直接800℃で20時間のアニールを行い、両者の構造を比較したところ、ノンドープ膜は ϵ -FeSiと β -FeSi₂の混合相となっていたのに対し、Cuドープ膜では β -FeSi₂の単一相が得られ、かつ β -FeSi₂の最大ピーク強度が、ノンドープ膜の約3倍であるという結果が得られた。これにより、Cuドープは既に報告のある α - β 転移促進効果に加えて、アモルファスからの β -FeSi₂形成促進効果もあることが新たに示された。従ってCu-ZMC膜中に ϵ -FeSiが存在していなかったのは、予備加熱下でのアモルファスからの相形成過程の違いに起因するのではないかと考えられた。

アモルファス状態の(Fe_{0.7}Cu_{0.3})Si_{2.2}膜に直接930℃と800℃、計40時間のアニールを行って得た膜と、ZMC処理を行ってから同様のアニールを行って得た膜の断面方向における断面をSEMによって観察した。その結果、アニールのみ膜では数百ナノ程度の粒子の凝集体構造を有しているのに対し、ZMCを経た膜は均一な連続膜となっていることが分かった。ZMC処理を経由することによって、 β とほぼ同程度の密度を有する α -FeSi₂の連続膜が形成され、かつこの α -FeSi₂層が上下SiO₂層との間で非常に安定な界面を有していたことで、アニール時の島状構造化が抑制されたものと考えられる。

以上の結果により、銅による α - β 転移促進効果と組み合わせることで、ZMC法の利用が β -FeSi₂薄膜製膜における新たな手法の1つとして有効であることが示された。

III. 金属ナノ粒子の局所電場増強効果による色素増感太陽電池の光電流の増加

色素増感太陽電池は比較的高い変換効率が期待でき、安価な製造コスト予想されることから次世代の太陽電池として注目されている。しかし実用化には更なる効率向上が必

要である。シリコン太陽電池を代表とする半導体を用いた太陽電池と比較して、色素増感太陽電池は光吸収層としてチタニア多孔質膜と色素のハイブリッド膜を使っており、そのハイブリッド膜中の色素によって光を吸収しているため、電池として利用できる光の波長範囲は比較的狭く、また光吸収層の吸収係数もそれほど高くない。したがって、色素増感太陽電池では、光吸収過程の向上が変換効率の向上に結びつきやすい。我々は、これまでに銀(Ag)ナノ粒子の表面プラズモンによる局所電場増強効果を使い、色素増感太陽電池に用いられている Ru 色素の吸収係数を最大で 149 倍に増加したことを報告している。しかし、これらは石英基板上に真空蒸着によって作製した Ag ナノ粒子によるもので、実際に効率向上を達成するためには色素増感太陽電池に用いられているチタニア多孔質内の数十ナノメートルの空間において Ag ナノ粒子と色素を相互作用させ光吸収係数を増加させなければならない。

ここでは、溶媒に分散した Ag ナノ粒子をチタニアナノ多孔質内に担持し、色素増感太陽電池の光吸収層の吸収係数を増大させることに成功した結果について述べる。

【実験】 1. 石英基板上における Ru 色素/Ag ナノ粒子複合膜の光吸収特性

エタノールに分散が可能なアルカンチオール修飾の Ag ナノ粒子を液相法により合成した。Ru 色素/Ag ナノ粒子の光吸収特性の測定には、合成したアルカンチオール修飾の Ag ナノ粒子とアミン系樹脂修飾の Ag ナノ粒子を用いた。これらのコロイド溶液を石英基板上に滴下、乾燥させた後、Ru 色素のエタノール溶液を滴下して光吸収特性を測定した。また、同濃度の Ru 色素溶液を石英基板に滴下し同様に測定して比較した。

2. チタニアナノ多孔質膜内に担持した Ru 色素/Ag ナノ粒子の光吸収特性

チタニア(TiO_2)ペーストを用いて石英基板上にスピコート法により薄膜を形成し、 450°C で焼結して TiO_2 ナノ多孔質膜を作製した。 TiO_2 多孔質膜をアミン系修飾 Ag コロイドのエタノール分散溶液に浸し、Ag ナノ粒子担持 TiO_2 膜を作成した後、熱処理を行った。熱処理時間条件を調整することで、Ag のプラズモン吸収特性を変化させた。さらに Ag/ TiO_2 膜上に Ru 色素溶液を滴下、乾燥し、光吸収特性を測定した。また、 TiO_2 膜上に滴下したサンプルと比較した。

【結果および考察】

1. 石英基板上における Ru 色素/Ag ナノ粒子複合膜における局所電場増強効果

図 7 にアミン系樹脂修飾 Ag コロイドから作製した Ru 色素/Ag ナノ粒子複合膜の光吸収スペクトルとその写真を示す。Ru 色素のみと比較して、複合膜では局所電場増強効果による吸光度の増大が見られた。得られたスペクトルをローレンツ分布関数でフィッ

ティングして Ru 色素および Ag の吸収ピークを分離した。その結果、Ag ナノ粒子による Ru 色素の吸光度の増大率は最大で約 27 倍となった。

2. チタニアナノ多孔質膜内に担持した Ru 色素/Ag ナノ粒子における局所電場増強効果

図 8 に各 Ag/TiO₂ 膜(A,B,C) 及び TiO₂ 膜上に Ru 色素溶液を滴下したときの滴下前後の光吸収特性の差スペクトルを示す。Ag/TiO₂ 膜(A,B,C) 上では色素の 540nm の吸収が増強されたことに起因する吸収ピークが 513nm 付近にみられ、513nm 付近の吸光度を、最大で約 14 倍に増加させることに成功した。さらに得られたハイブリッド膜を使って色素増感太陽電池を作製して光電流の増大についても検討した。

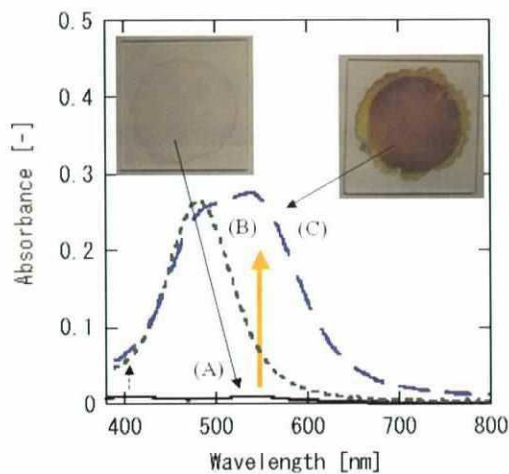


図 7 熱処理したアミン系修飾 Ag ナノ粒子と Ru 色素および Ru 色素/Ag ナノ粒子複合膜の光吸収特性：(A)Ru 色素(Ru 表面濃度； 1×10^{-9} mol/cm²) (B)Ag ナノ粒子 (C) Ru/Ag 複合膜(Ru 表面濃度； 1×10^{-9} mol/cm²)

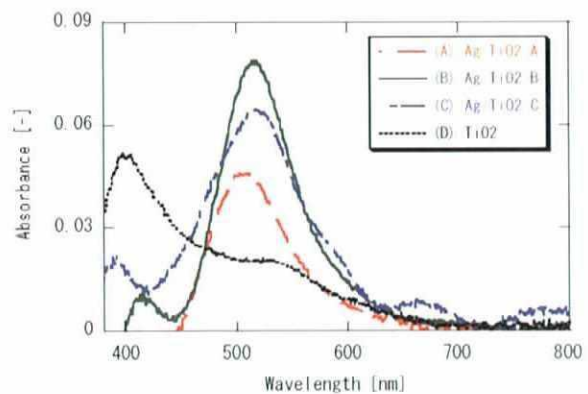


図 8 Ru 色素/Ag ナノ粒子/TiO₂ 複合膜および Ru 色素/TiO₂ 複合膜における Ru 色素溶液滴下前後の光吸収特性の差スペクトル(Ru 表面濃度； 8×10^{-10} mol/cm²)

3 今後の展開

ZMC 法で作製したシリコン薄膜、 β -FeSi₂ 薄膜および α -FeSi₂ ハイブリット薄膜の電気物性等の諸物性の測定やそれらを使った高効率太陽電池の作製を行いたい。また、金属ナノ粒子による局所電場増強効果を利用した他の材料とのハイブリット材料を用いた太陽電池の作製も検討したいと考えている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり貴重なご意見をいただきました領域総括である合志先生および領域アドバイザーの先生方、また、加藤さん、大野さんをはじめサポートしてくださいました領域事務所の皆様方に厚くお礼申し上げます。本研究の成果は、本さきがけ JST 博士研究員である田中優実氏、本研究に従事してくれた学生諸氏らの努力の賜です。ここに謝意を表します。

研究成果リスト

(論文)

- (1) S. Yokoyama, M. Ihara, K. Izumi, H. Komiyama, C. Yokoyama, Fabrication of SOI films with high crystal uniformity by high-speed zone-melting crystallization, *Journal of The Electrochemical Society*, **150**, A594 (2003).
- (2) M. Ihara, K. Matsuda, C. Yokoyama, Stable power generation using a Solid Oxide Fuel Cell with a Ni/Gd-doped CeO₂ cermet anode in 100% dry-CH₄ fuel based on the anode reaction mechanism, *KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU*, **29**, 208 (2003).
- (3) M. Ihara, K. Ito, C. Yokoyama, Expansion of range of light-producing photocurrent by using mixed dye in a dye-sensitized solar cell, *KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU*, **29**, 238 (2003).
- (4) S. Yokoyama, M. Ihara, H. Hashizume, C. Yokoyama, H. Komiyama, Fabrication of crystalline silicon films for solar cells by a new method of gas-flow zone melting crystallization, *KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU*, **29**, 242 (2003).
- (5) M. Ihara, K. Matsuda, H. Sato, C. Yokoyama, Solid state fuel storage and utilization through reversible carbon deposition on an SOFC anode, *Solid State Ionics*, **175**, 51(2004).
- (6) I. Taniguchi, S. Miyashita, J. Ishida, M. Ihara, C. Yokoyama, Fabrication of porous titanium dioxide thin films by electrostatic spray deposition and their application to dye-sensitized solar cells, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, **29**, 1913 (2004).
- (7) Y. Tanaka, M. Ihara, Fabrication of FeSi₂ films for solar cells using thin film zone melting crystallization, *Proceedings of 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-15)*, **1**, 499 (2005).
- (8) M. Ihara, K. Ito, S. Yokoyama, C. Yokoyama, Evaluation of the charge transfer processes in dye sensitized solar cell by using applied voltage impedance spectroscopy, submitted.
- (9) M. Ihara, S. Hasegawa, Quickly rechargeable direct carbon solid oxide fuel cell, submitted.

(口頭発表)

- (1) 横山, 伊原, 横山, シーディング ZMC 法によって作製したシリコン薄膜の電気的特性の評価, 化学工学会第 68 年会, 2003.3.
- (2) Ihara, Matsuda, Sato, Yokoyama, New solid oxide fuel cell using pyrolytic carbon fuel, 14th International Conference on Solid State Ionics, 2003.6.
- (3) 石田, 伊原, 横山, 金属ナノ粒子による局所電場増強効果を利用した Ru 色素の吸収係数増大と色素増感太陽電池への応用, 化学工学会秋季大会, 2003.9.
- (4) 伊原, 松田, 横山, 固体炭素燃料を用いたリチャージャブル固体酸化物燃料電池の発電実験, 第 12 回 SOFC 研究発表会, 2003.12.
- (5) 石田, 伊原, 谷口, 横山, 静電噴霧沈着法により合成した TiO₂膜を用いた色素増感太陽電池の発電特性と交流インピーダンス法による評価, 化学工学会第 69 年会, 2004.4.
- (6) 伊原, 長谷川, 玉浦, 固体炭素燃料を用いたリチャージャブル固体酸化物燃料電池の発電特性と電極構造の関係, 第 13 回 SOFC 研究発表会, 2004.12.

[化学工学会第 70 年会, 2005.3, 以下 2 件]

- (7) 田中, 伊原, 馬場, 薄膜ゾーンメルティング法による太陽電池用 FeSi_x 薄膜の作製
- (8) 馬場, 伊原, 田中, 薄膜 ZMC 法により作製した太陽電池用低欠陥 Si 薄膜の結晶配向メカニズムの検討
- (9) 田中, 伊原, 馬場, 薄膜ゾーンメルティング法による太陽電池用 FeSi_x 薄膜の作製, 春季第 52 回応用物理学関係連合講演会, 2005.3.
- (10) 長谷川, 伊原, 熱分解炭素を直接燃料に用いたリチャージャブル SOFC の供給ガスと発電特性の関係, 電気化学会第 72 回大会, 2005.4.
- (11) 田中, 伊原, 銅による α - β 転移促進効果を利用した薄膜ゾーンメルティング法による β -FeSi₂ 薄膜の作製, 秋季第 66 回応用物理学学会学術講演会, 2005.9.

[2005 年電気化学秋季大会, 2005.9, 以下 4 件]

- (12) 長谷川, 伊原, 熱分解炭素を用いたリチャージャブル SOFC の発電特性と炭素利用効率の評価
- (13) 中村, 花村, 伊原, プロトン導電セラミクスを用いた SOFC アノードの評価
- (14) 菅野, 井上, 伊原, 色素増感太陽電池のチタニア多孔質膜中への銀ナノ粒子の導入により生じる発電特性への影響と効果.
- (15) 伊原, 石田, 横山, 色素増感太陽電池用チタニア多孔質膜中における色素の局所電場増強効果による吸光度の増加

[化学工学会第 37 回秋季大会, 2005.9, 以下 5 件]

- (16) 菅野, 井上, 伊原, 色素増感太陽電池のチタニア多孔質膜中に担持された銀ナノ粒子が発電特性に及ぼす効果,
- (17) 伊原, 石田, 横山, 色素増感太陽電池用チタニア多孔質膜中での銀ナノ粒子による局所電場増強効果
- (18) 井上, 菅野, 伊原, 順バイアス印加インピーダンス法による色素増感太陽電池の電荷移動過程の検討

- (19)澤木, 田中, 尾崎, 伊原, 界面を利用した太陽電池用 Si 薄膜の結晶配向性の制御
- (20)田中, 伊原, 金属-半導体転移を経て得られた太陽電池用 Fe-Si 系薄膜の構造
- (21)Y. Tanaka, M. Ihara, Fabrication of FeSi₂ films for solar cells using thin film zone melting crystallization, PVSEC-15, 2005.10.

[第 14 回 SOFC 研究発表会, 2005.12, 以下 2 件]

- (22)長谷川, 伊原, 熱分解炭素を用いたリチャージャブル SOFC の燃料極材料の検討
- (23)C. Levy, M. Ihara, K. Yamahara, Power generation of SOFC using dry methane fuel with doped-ceria anodes
- (24)C. Levy, S. Nakamura, S. Hasegawa, K. Yamahara, K. Hanamura, M. Ihara, Electrochemical characteristics of Ni/Gd-doped ceria and Ni/Sm-doped ceria anodes for SOFC using dry methane fuel, 29th International Conference on Advanced Ceramics & Composites, 2006.1. [その他含め、口頭発表 全 30 件]

(著作、依頼講演等その他)

- (1) 伊原, 燃料電池は今、自動車用固体酸化物型燃料電池の開発 —なぜ、燃料電池自動車なのか?、月刊化学 (化学同人), p. 18, 第 58 巻第 8 号 (2003).
- (2) 伊原, 固体酸化物燃料電池の開発ロードマップ, 「骨太のエネルギーロードマップ」化学工学会エネルギー部会編, (株)化学工業社, 2005.11.
- (3) 伊原, 「熱分解固体炭素を燃料とする携帯型リチャージャブル SOFC」、次世代電源事情 (仮称)、株式会社エヌ・ティー・エス、2005.12 発刊予定
- (4) 伊原, 金属ナノ粒子の局所電場増強効果利用色素増感太陽電池, 「ナノパーティクルテクノロジーハンドブック」, 日刊工業新聞社, 2006.3 発刊予定
- (5) 伊原, 太陽電池とバイオテクノロジーの融合, バイオイメージング学会と化学工学会の連携による「ナノとバイオの融合学理構築, 産業基盤形成」シンポジウムにて講演, 2003.9.
- (6) 伊原, 光吸収領域の拡張および局所電場増強効果による色素増感太陽電池の高効率化技術, 技術情報協会セミナー「色素増感太陽電池の高変換効率・高耐久性とその信頼性」にて講演, 2003.9.
- (7) 伊原, 水素発生型、熱分解固体炭素を燃料とする固体酸化物燃料電池の開発, NEDO 燃料電池・水素シンポジウムにて講演, 2004.7.
- (8) M. Ihara, Development of high-efficient photoelectric conversion materials, INSA de Lyon (フランス国立応用科学研究所リヨン校, フランス・リヨン) にて講演, 2005.10.
- (9) 伊原, 金属ナノ粒子を使って色素増感太陽電池の光吸収過程を高効率化する!—表面プラズモン共鳴を使った色素の吸収係数の増大—, 東京農工大学公開講座「次世代光機能材料を指向したナノ構造体のデザイン」にて講演。2005.11.

(特許)

特願 2003-297780 固体酸化物型燃料電池及び固体酸化物型燃料電池の運転方法、

出願人 (科学技術振興事業団)、発明者 (伊原学, 横山千昭) 2003 年 8 月 21 日。