

応用物理学会薄膜・表面物理分科会 NEWS LETTER No.141 (Mar. 2011)

目次

巻頭言	意気消沈シンドロームから脱却しよう	大泊 巖	1
研 究	第三世代太陽電池研究開発の現状		
	—シリコン量子ドット・ワイヤを用いた新世代太陽電池—	黒川 康良	3
	太陽電池のデバイスシミュレーション		
	- CIGS 太陽電池の最適設計 -	峯元 高志	13
最新技術情報	CIGS 太陽電池における欠陥準位評価法 (電気・光学測定) の紹介		
		櫻井岳暁	23
談話室	研究室紹介 大阪大学大学院工学研究科 渡部研究室	渡部平司	31
Brush up English	科学英語一言メモ(11): 終わっているけれど終わっていない現在完了		
		山下理恵	34
掲示板			
	研究会概要報告		
	第 38 回 薄膜・表面物理基礎講座 開催報告	小高秀文・渡邊孝信	35
	ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理— (第 16 回) 開催報告		
		渡部平司	37
	International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices - Science and Technology— (IWDTF11) 開催報告	渡部平司	38
	開催案内		
	第 39 回 薄膜・表面物理セミナー		39
	2011 年度 薄膜・表面物理分科会 幹事選挙結果報告		40
議事録			
	第 39 期第 2 回 幹事会議事録抄録		41
	第 39 期第 3 回 幹事会議事録抄録		43
	第 39 期第 3 回 常任幹事会議事録抄録		45
	第 39 期第 4 回 幹事会議事録抄録		47
	第 39 期第 4 回 常任幹事会議事録抄録		49
会 告	ニュースレター投稿規定		50
	応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第 39 期常任幹事名簿		51
	応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 会員数、賛助会社名簿		52
編集後記			53

*分科会会員はホームページ(<http://annex.jsap.or.jp/tfspd/>)からカラー版 PDF ファイルをダウンロードすることができます (パスワードは"Audrey"です)。

表紙の図: シリコン量子ドット薄膜太陽電池の構造例と電流-電圧特性

(黒川氏提供, 詳しくは本紙 3 ページ参照)

「意気消沈シンドロームから脱却しよう」

大泊 巖（早稲田大学名誉教授）

現在の日本は、高齢化と人口減少が経済と社会の活力を奪いつつあるため、長引く不況、国家の財政危機、社会保障制度崩壊の危機、に苦しんでいる。外国では、日本のこの深刻な状況をジャパンシンドロームと呼んで、自国が同じ轍を踏まないための自戒としている。2010年に中国のGDPが遂に日本を抜いたことも日本人の自信喪失に拍車をかけた。生産拠点を海外に移す日本企業、それが原因となって生み出した若者達の就職難、日本の危機に対する認識が薄く、政争に明け暮れる政治家達、等の症状も、私達を憂鬱にしている。私はこの状態を「意気消沈シンドローム」と呼ぼうと思う。

眼を世界に転じると、地球温暖化の進行、資源権益獲得競争、が激化しつつあり、それらへの対応も急がれている。さらに、2011年に入って、世界各地での民主化運動の高まりが、従来からの民族運動とともに、世界の政治および経済の不安定要因となっており、難民問題も今後更に拡大すると予想される。塩野七生氏が指摘するように、難民問題は今後の日本の重荷になりかねない。

これほど多数の困難なことが同時に押し寄せている状況は過去に無かったのではない。このような状況から脱却する術はないのであろうか。

意気消沈シンドロームから脱却するには、結局、科学技術振興による立国しかないのであるが、そのためには、抽象的ながら、二つの意識改革が必要、と私は考えている。一つは、科学技術を支援する人達、すなわち納税者に求められる意識改革であり、他の一つは科学技術に直接与る研究者、とりわけ税金を使って研究を進めている人達に求められる意識改革である。私達は研究者であると同時に納税者でもあるが、ここでは、研究者であることに軸足を置いて話を進めよう。

その昔、古代ローマのマエケナスや15世紀のメディチ家の人々は、パトロンとして文芸家や芸術家を支援し、人類の文化遺産の創造に大きく貢献した。翻って現在では、純粋基礎研究の全ておよび目的基礎研究の一部は、税金によって支えられているので、「科学技術研究のパトロンは納税者である」ということができる。しかし、税金として徴収されたお金の行く末、とりわけ科学技術の振興にどう使われたかについて、納税者の関心はあまり高くない。納税者は、まず、科学技術のパトロンたる自負と自覚を持つべきなのである。昔のパトロン達が、結果として、文化の庇護者としての名声を獲得したのに対して、現代の納税者は、パトロンたるメリットを十分に享受しているとはいえないからである。

最近ようやく、説明責任とかイノベーションという言葉が頻繁に使われはじめたが、パトロンたる納税者に返礼すべきものは、経済的価値に限らない。ワールドカップやオリンピックでの日本選手の活躍は私達に「感動や喜び」を与えてくれたし、苦難の果ての「はやぶさ」の帰還は科学に疎い人達の「好奇心」を大いに刺激した。ノーベル賞受賞者の輩出、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」による国際貢献は、私達日本人の「誇り」となっている。このような傑出した例でなくても、科学技術の成果を追求する私達の日頃の努力に「納税者への感謝の気持ち」を加えることで、科学技術立国を目指す動きに大きな力が付加されることは間違いないのである。

受益者であり納税者でもあるという二面性を持つ私達の責務は、具体的には二つある。一つは、科学技術に対する納税者の理解増進に努め、上述の“投資効果”に関する意識改革を助けることである。もう一つは、研究者一人一人が、国は科学技術振興の長期戦略を持たないなどと嘆くばかりではなく、異分野との交流、リスクなことへの挑戦、グローバルな視野を持つ人材の育成、公への貢献、など、既存の枠に捕らわれない活動を始める気概を持つことである。私達科学技術に与る者達が日本の苦境を救うためにできることは少なくない。

第三世代太陽電池研究開発の現状 —シリコン量子ドット・ワイヤを用いた新世代太陽電池—

黒川 康良

東京工業大学 大学院理工学研究科 電子物理工学専攻

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S9-10

1. 本講演の目的

太陽光発電技術は CO_2 を排出しないクリーンエネルギーであることから温室効果ガス排出量の低減の有力な手段として、近年期待度は大きく高まっている。その中で、第三世代太陽電池という言葉が耳に入ることも多くなった。第三世代太陽電池は太陽電池の変換効率を現行のものと比較して飛躍的に高めることが可能な構造や概念を用いたもので、夢のあるテーマである。しかしながら、その内容は挑戦的な部分が多く、課題は多く残されている。ここでは、第三世代太陽電池として提案されている構造や概念に関して紹介し、研究開発の最前線に関してシリコン量子ドット・ワイヤを用いた研究を中心に概観する。

2. 太陽光発電技術開発ロードマップ PV2030+と第三世代太陽電池

2009年6月に新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より発表された太陽光発電技術開発ロードマップPV2030+¹においては、太陽光発電が「2050年までに CO_2 発生量半減への一翼を担う主要技術になり、我が国ばかりでなくグローバルな社会に貢献できること」を目指し、「2050年までに我が国の一次エネルギー供給の10%程度を太陽光発電がまかない、 CO_2 の削減に貢献する」をコンセプトに加えている。これに対応するために、経済性改善を加速し、地球温暖化への対応で想定される太陽光発電の大量利用を実現するための課題と解決策、及びこれに対する技術開発シナリオを再構築している(図1)。また、ロードマップの時間的視野を2050年まで拡大しただけでなく、量子ナノ構造太陽電池や新規概念の原理を活用した第三世代太陽電池の開発により2050年に向け、発電効率40%超を目指すことを提言している。

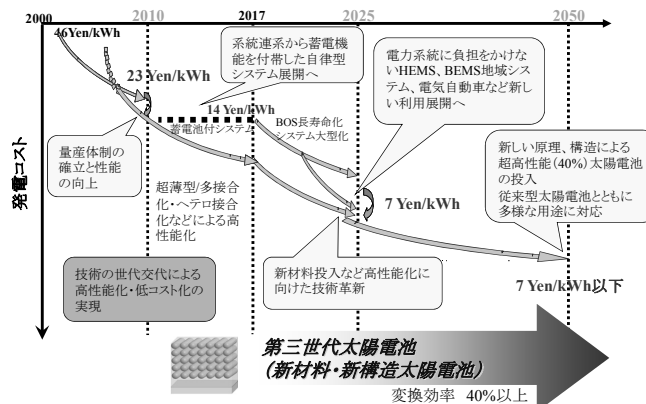


図1 太陽光発電技術ロードマップ PV2030+

それでは、第三世代太陽電池とは
 どういったものなのか。第一世代のバ
 ルクシリコン太陽電池に対して、薄膜
 シリコンやCIGS、CdTeなどの薄膜太
 陽電池を第二世代太陽電池と呼ぶ
 ことに抵抗を感じる者は少ないと思
 われる。第一世代の太陽電池である
 結晶シリコン太陽電池は、現時点で
 も全太陽電池生産量の 8 割強を占
 めている。第二世代の太陽電池であ
 る薄膜太陽電池は、ここ数年で事業
 化が急速に進み、CdTe 薄膜太陽電
 池を生産している First Solar 社(米)
 は 2009 年の全太陽電池年生産量
 第一位を奪取するまでに至った。一

方、その先を行く第三世代については、大きく意見の分かれるところであるが、ここでは最初に
 第三世代という用語を用いた M. Green(New South Wales 大学、Australia)の提案した新構造
 を第三世代太陽電池と呼ぶことにする。M. Green のいう第三世代の太陽電池とは、従来の太
 陽電池の基本原理を破るため新概念を導入し、効率 40%を超えるような超高効率の変換効
 率を示す太陽電池を 100\$/m² という低コストで実現しようというものである²。PV2030+におい
 ては、2050 年までに変換効率 40%以上で発電コスト 7 円/kWh 以下を目指す新概念太陽電
 池の開発が盛り込まれており、これが、日本における第三世代太陽電池に対応する。

それでは、効率 40%を超えるような太陽電池を開発するためにはどのような概念が必要であ
 るのか？それには、太陽電池

の根本原理を振り返る必要
 がある。最初に太陽電池の
 変換効率を物理的法則から
 示したのが、Shockley と
 Queisser である³。その計算
 結果を図2に示す。Ultimate
 Limit とは、太陽を温度
 6000K の黒体と仮定し、黒体
 から輻射される光子の内
 $h\nu > E_g$ のエネルギーを持つ
 フォトンが太陽電池内にて電
 子正孔対を必ず一対生成し、
 $h\nu_g/q$ 電圧を得るという仮定
 のもとに計算された限界効率

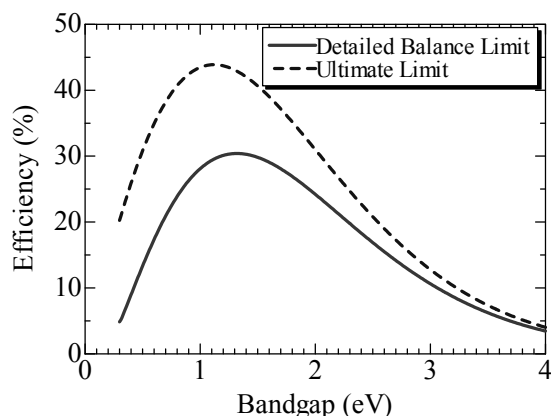
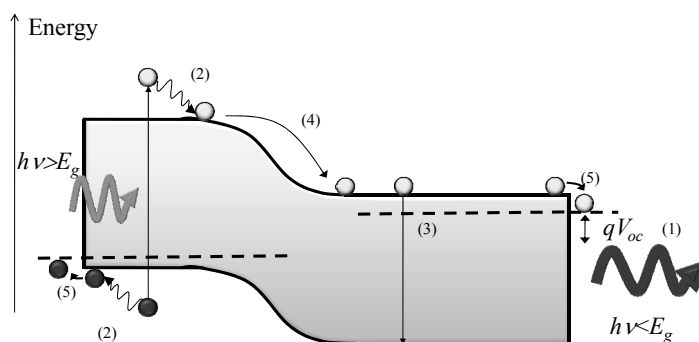


図2 Shockley, Queisser により示された
 太陽電池の理論限界効率



- (1) 透過損失
- (2) 熱緩和による電圧損失
- (3) 再結合損失
- (4) pn接合部における電圧損失
- (5) 電極接合部における電圧損失

図3 太陽電池構造の各種損失

である。下記にこの計算における前提条件をまとめておく。

1. 発電層(バンドギャップ)が1種類(単接合)
2. 入射光は 6000K の黒体による輻射スペクトルそのものと仮定
3. 生成した少数キャリアはすぐに熱緩和
4. フォトン一つに対して生成する電子・正孔対は一對

これに加えて、放射性再結合・太陽の幾何パラメータ、ダイオードの電圧電流特性の曲線因子を考慮することで、より現実的な **Detailed Balance Limit** が計算される。この計算結果からもわかるように、太陽電池の変換効率の限界値は、太陽電池材料(吸収層)のバンドギャップに大きく依存している。単接合にて作製された太陽電池の変換効率限界は $E_g=1.32\text{eV}$ 付近で 30%程度である。それでは、残りの 70%程度はどこにいったかということ、主に透過損失と熱損失である。バンドギャップよりエネルギーの低いフォトンが太陽電池材料に吸収されずに透過してしまう(透過損失)。また、バンドギャップよりエネルギーの高いフォトンの場合、太陽電池材料により吸収されるが、価電子帯から伝導帯中に遷移した電子はエネルギーを熱として放出しながら伝導帯の底まで直ちに熱緩和してしまうため、これも損失となる(熱緩和損失)。この両者により、入射するフォトンのエネルギーの約半分を失ってしまう。このようなことを考えると、透過損失及び熱緩和損失を少なくすることが第三世代太陽電池への第一歩といえる。したがって、第三世代太陽電池を実現するためには、上述した前提条件を打ち破る原理を利用した太陽電池の開発をすればよいということになる。

4. 第三世代太陽電池の種類

前提条件1を覆すコンセプトがタンデム型太陽電池(積層型太陽電池)や中間バンド型太陽電池である。光を効率よく、電子・正孔対に変換するには、フォトンのエネルギーと太陽電池材料のバンドギャップに差がないことが望まれる。そこで、光の入射側からバンドギャップの大きな材料→小さな材料と積層し、短波長の光から長波長の光へと順に吸収していく方法がタンデム型太陽電池である(図4(a))。このようなタンデム型太陽電池は、III-V族系化合物半導体で研究が進んでおり、国内では、シャープが非集光 AM1.5G 下で効率

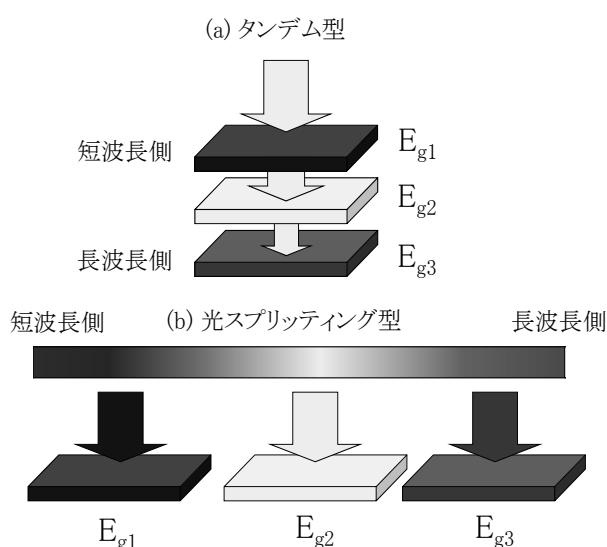


図4 太陽光を分割して利用する方法

35.4%の世界最高値(2009年11月)を達成している⁴。Spectrolab社(米)は、同様な構造の集光型タンデムセルで364倍の集光動作下で41.6%を報告した⁵。但し、このような化合物タ

ンデム太陽電池は製造コストの面で第三世代太陽電池としての要件を満たすには課題が残されており、低コスト作製可能なバンドギャップチューニングできる新材料の開発が必要となる。

中間バンド型太陽電池は、バンドギャップ内に別のバンド(中間バンド)を形成させることで、元のバンドギャップによる吸収に加えて、中間バンドを介した2光子吸収過程が加わり、収集する電流量が増加するため、効率を飛躍的に向上できるというものである。中間バンド型太陽電池材料として化合物系半導体量子ドット⁶⁻⁹やカルコパイライト系材料¹⁰、高不整合合金(ZnMnOTe^{11} など)などの研究が進められている。

2に関しては、光のスペクトルそのものをチューニングする方法が挙げられる。図4(b)のように、光をスプリッターにより波長ごとに分割し、その波長帯に適合したバンドギャップを有する単接合太陽電池に照射する方法がひとつである¹²。また、透過損失となる長波長側のフォトンを用いて2光子吸収を利用してエネルギーの高いフォトンに変換するアップコンバータも研究が進められている^{13, 14}。

3を解決しようとするのがホットキャリアセルと呼ばれるものである。ホットキャリアセルの基本的な概念は、熱緩和損失を防いで、ホットキャリアの状態で何とか外部に取り出したいと言うものである。これにはキャリアの熱緩和時間が通常より長くなる構造及びホットキャリアを取り出す際にエネルギー緩和をさせないような選択的なエネルギー接合が必要であり、量子ナノ構造や InN 、 InP などの新規材料の探索が行われている¹⁵⁻¹⁹。

4を覆すのが、マルチエキシトン効果である。量子ドットを用いると、一つの短波長フォトンから2組以上の電子-正孔対を発生させることがバルクより容易に起こるとの報告があり、これを太陽電池に応用するのがマルチエキシトン型太陽電池である。マルチエキシトン効果を示唆する結果報告のある材料として、 $\text{PbSe}^{20, 21}$ 、 PbS^{21} 、 CdSe^{22} 、 InAs^{23} 、 Si^{24} などのいくつかのナノ粒子やカーボンナノチューブ^{25, 26}が挙げられる。

5. シリコン量子ドットを用いた太陽電池

シリコン量子ドットは、地球上に豊富に存在するシリコンで構成されていることから、材料やコストの面で化合物系量子ドット材料と比べて有利である。それでは、シリコン量子ドットを用いてどのような新概念太陽電池が可能となるのか？

シリコン量子ドットを第三世代太陽電池応用する際には、2つのコンセプトが関連している。タンデム型とマルチエキシトン型である。ここでは、タンデム型について詳述する。III-V族系化合物半導体タンデム太陽電池にて集光下では40%を超える高効率を実現できているということを述べたが、発電コストを抑えることが課題となる。発電コストを抑え、広く普及させるには現在太陽電池として広く用いられているシリコンがまず思いつく。シリコン量子ドットのみを用いてタンデム型に応用するためには、バンドギャップ制御を可能にする必要があるが、量子ドットはそれを可能にする量子サイズ効果を有している。量子井戸が形成されると、電子は其中に閉じこめられ、離散的な準位にしか存在できなくなる。その準位の高さは、量子井戸の大きさにより決定される。したがって、井戸のサイズを変えることで、吸収できる光の波長範囲を制御

することが可能となる。また、量子井戸の深さが比較的浅い場合、電子の波動関数は障壁内にしみ出すことができる。隣同士の量子井戸が近くに存在することで、ミニバンドが形成し、生成したキャリアをミニバンドより取り出すことが可能となる。

このような構造として、図5に示すようなシリコン量子ドット超格子構造 (Silicon quantum dots superlattice: Si-QDSL)が挙げられる。Si-QDSL とは、シリコンより禁制帯幅の大きな材料中にシリコン量子ドットが 2-3

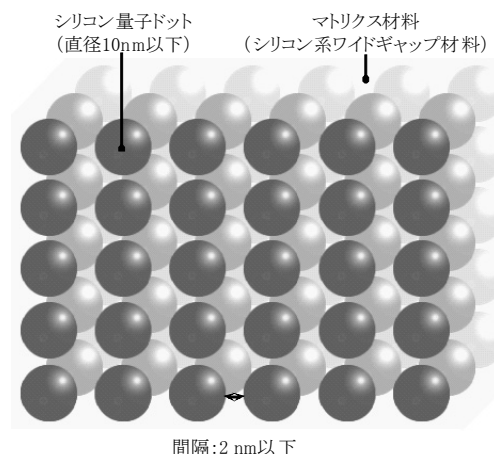


図5 シリコン量子ドット超格子構造

nm 以下の間隔で配列した周期構造をしている。これにより、ワイドギャップ材料の伝導帯の下側及び価電子帯の上側にミニバンドが形成する。量子井戸による中間バンド型と異なるのは、ミニバンドが伝導帯及び価電子帯側の双方に形成されること及び伝導帯・価電子帯に比較的近い位置に形成されることである。ミニバンド間のエネルギー差が新たなバンドギャップとして見なされるため、シリコン量子ドットのサイズを制御することで、バンドギャップの制御が可能となる。シリコン量子ドットのサイズの異なる Si-QDSL 薄膜を何層か積層することにより、広い波長範囲の太陽光スペクトルを吸収でき、40 %以上といった飛躍的な高効率化が期待できる²⁷。シリコン量子ドットを取り囲むワイドバンドギャップ材料の候補としては、 SiO_2 や Si_3N_4 、 SiC が考えられており、シリコンベースの材料のみで作製が可能であるため、原料の心配がなく、無毒であり、低コスト・高効率を実現できる太陽電池新材料として期待される。

従来、量子効果が発現する直径 10 nm 以下のシリコン量子ドットを含む Si-QDSL 作製は難しかった。しかしながら、2002 年、Max-Planck 研究所の Zhacharias らは、比較的簡単なプロセスにより Si-QDSL の作製に成功した²⁸。彼らは、反応性蒸着法を用いて、 $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ 積層膜を堆積し、それを熱アニールすることにより、サイズ制御された Si-QDSL を作製した。この方法は、熱的に不安定な SiO_x 層を熱的に安定な SiO_2 層で挟むことで、アニール時に偏析するシリコン量子ドットの直径を SiO_2 層で制限し、10 nm 以下のスケールで直径の制御を可能にした。また、フォトルミネッセンス測定により、量子ドット粒径 3.8~2.0 nm に対して、1.3 eV~1.5 eV 程度まで禁制帯幅制御にも成功している。現在、このような方法を用いて作製された Si-QDSL を太陽電池応用しようと研究を進めているグループを表1に示す。Si-QDSL を最初に太陽電池応

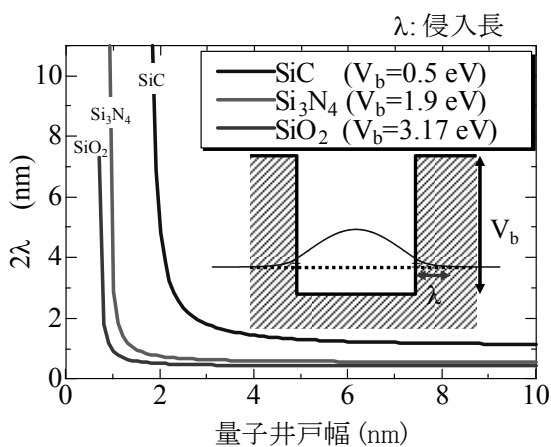


図6 ワイドギャップ材料内のシリコン量子ドットにおける波動関数の浸み出し

用しようと試みたのは New South Wales 大学の Green らのグループである。彼らは 2005 年、 SiO_2 系 Si-QDSL、 Si_3N_4 系 Si-QDSL の作製に成功した^{29, 30}。最近では、 SiO_2 系 Si-QDSL をドーピング層として結晶 Si ヘテロ接合太陽電池を作製し、Si-QDSL がドーピング層として機能することを示した³¹。一方、障壁の高さが低く、キャリアの電気伝導的に有利とされる SiC を用いて Si-QDSL の作製に成功したのは東工大の小長井らである³²。図6は有限ポテンシャル量子井戸中の波動関数の浸み出しを計算した結果であるが、SiC はバリアの高さが 0.5eV と比較的低いことから、波動関数の浸み出しが他のシリコン系材料に比べて大きいことがわかる。これは、少数キャリアを収集しなければならない太陽電池材料としては SiC が最適なバリア材料であることを示している。また、バリアの高さが 0.5eV 程度あれば、三次元球型ポテンシャルによる閉じ込めにより、バンドギャップを 1.1-2eV 程度まで制御できることが図7に示す有効質量近似による計算結果からわかる。小長井らは、SiC 系 Si-QDSL を発電層として用い、太陽電池構造を作製し、初めて光起電力効果を確認している³³。その後、図8に示した構造でドーピング層のシート抵抗を低減するなどして、シリコン量子ドット太陽電池としては最高の 518 mV の開放電圧を達成している³⁴。このように、太陽電池材料としての動作確認はできたが、それがミニバンドに関連するものなのか、移動度ギャップの制御はできているのかなど原理の根本を示すデータは得られていない。これらの実証及び作製プロセスの低温化・膜質の向上などの課題が残されている。

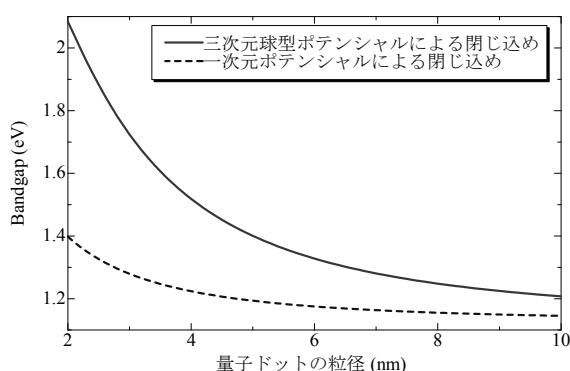


図7 3次元球型ポテンシャルによる閉じ込めを利用した場合のバンドギャップの量子ドット粒径依存性

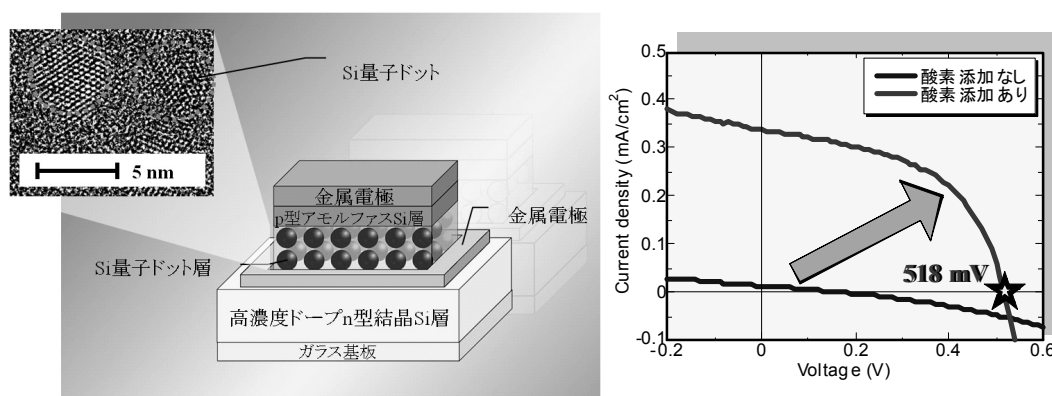


図8 シリコン量子ドット薄膜太陽電池の構造例と電流-電圧特性

表1 シリコン量子ドット超格子膜を利用した太陽電池の研究を行っている機関

バリア材料の種類	著者名	所属機関	発表年	作製方法
a-SiO ₂ matrix	M. Green <i>et al.</i> ²⁹	University of New South Wales	2005	Sputtering/Annealing
	M. Ficcadenti <i>et al.</i> ³⁵	University of Camerino	2008	Sputtering/Annealing
a-Si ₃ N ₄ matrix	Y. H. Cho <i>et al.</i> ³⁰	University of New South Wales	2005	Sputtering/Annealing PECVD/Annealing
	B. Rezgui <i>et al.</i> ³⁶	Université de Lyon	2008	PECVD/Annealing
a-SiC matrix	Y. Kurokawa <i>et al.</i> ³²	Tokyo Institute of Technology	2006	PECVD/Annealing
	D. Song <i>et al.</i> ³⁷	University of New South Wales	2008	Sputtering/Annealing
	M. Künle <i>et al.</i> ³⁸	Fraunhofer Institute	2008	PECVD/Annealing
	C. Summonte <i>et al.</i> ³⁹	CNR-IMM Sez.di Bologna	2008	PECVD/Annealing
	J. H. Moon <i>et al.</i> ⁴⁰	Korea Institute of Energy Research	2009	Sputtering/Annealing

6. シリコンナノワイヤを用いた太陽電池

シリコン量子ドットとともにバンドギャップ制御が可能なシリコン系新材料としてシリコンナノワイヤ (Silicon Nanowire: SiNW) がある。SiNW は、1964 年、米 Bell 研究所の Wagner らにより、Vapor Liquid Solid メカニズムを用いて初めて作製された⁴¹。シリコン基板上に Au ドットを形成し、基板加熱により、Au/Si アロイの液体 (Liquid) を生成させ、気相 (Vapor) のテトラクロロシランからシリコン原子を吸収させる。液体中のシリコン原子が過飽和状態となると、シリコン原子が下に溜まって融点が上昇し、結晶 (Solid) が析出する。このようにして SiNW が成長する。当時は、950 °C まで加熱することが必要であり、SiNW 直径も 50 nm が限界であった。現在では、プリカーサーとして SiH₄ を用いることで、成長温度を Au/Si の共融温度 370 °C 付近まで低減し、直径 10 nm 以下の SiNW が得られている⁴²。その他の SiNW の作製方法としては、Oxide-assisted catalyst-free method⁴³、溶液成長法⁴⁴、RIE によるエッチング⁴⁵、フォトリソグラフィ⁴⁶、Metal Assisted Chemical Etching method⁴⁷ などが挙げられる。SiNW を太陽電池応用しようという研究は、ここ 2, 3 年前から、発表されるようになった。SiNW を太陽電池構造に用いる際のメリットとしては、光散乱による光閉じ込め効果、量子サイズ効果によるバンドギャップの制御が挙げられる。IMEC や Harvard 大学⁴⁸、UC Berkeley⁴⁹、IBM⁵⁰、東京農工大⁵¹、GE⁵²、Max Planck 研究所⁵³、清華大学⁵⁴ などが現在 SiNW 太陽電池作製に関する報告を行っている。Harvard 大学の Lieber らは、単一の SiNW を用いて、図 2(b) のような p-i-n 同軸構造を作製し、1sun 照射時に開放電圧 260 mV、短絡電流 0.503 nA (～15 mA/cm²)、曲線因子 0.55、変換効率 2.1 % 程度を達成している⁴⁸。このような単一の SiNW を太陽電池にするケースはほとんどなく、シリコン基板をエッチングなどの方法でトップダウン的にナノワイヤを形成する例がほとんどである。これらの SiNW 太陽電池は、シリコン基板上に作製されているため SiNW における発電を分離するのが困難である。SiNW の高い光散乱効果を示す結果は得られているものの、表面積が大きくなってしまったため、変換効率の向上には効果的な表面パッシベーション技術の開発が必須である。また、今のところ SiNW の直径が比較的大きいため、量

子サイズ効果が発現するには至っていない。しかしながら、香港市立大学のMaらが示したように、SiNWにおいても直径を3 nm以下にすることで禁制帯幅を増大することが可能である⁵⁵。このことから、SiNWにおいてもシリコン量子ドットと同様に禁制帯幅制御が可能な材料を開発することができると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、経済産業省のもと、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託され実施したものであり、関係各位に感謝致します。

References

- ¹ (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, <http://www.nedo.go.jp/library/pv2030/pv2030+.pdf> (2009).
- ² M. A. Green, Prog. Photovolt. Res. Appl. **9**, 123 (2001).
- ³ W. Shockley and H. J. Queisser, Journal of Applied Physics **32**, 510 (1961).
- ⁴ T. Takamoto, et al., Proceedings of the *35th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Hawaii, USA, 2010), p. to be published.
- ⁵ R. R. King, et al., Proceedings of the *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009), p. 55.
- ⁶ R. Oshima, A. Takata, and Y. Okada, Applied Physics Letters **93**, 3 (2008).
- ⁷ A. Marti, N. Lopez, E. Antolin, E. Canovas, C. Stanley, C. Farmer, L. Cuadra, and A. Luque, Thin Solid Films **511**, 638 (2006).
- ⁸ S. M. Hubbard, C. D. Cress, C. G. Bailey, R. P. Raffaele, S. G. Bailey, and D. M. Wilt, Applied Physics Letters **92**, 3 (2008).
- ⁹ S. P. Bremner, M. Y. Levy, and C. B. Honsberg, Applied Physics Letters **92**, 3 (2008).
- ¹⁰ D. F. Marrón, A. Martí, and A. Luque, physica status solidi (a) **206**, 1021 (2009).
- ¹¹ K. M. Yu, W. Walukiewicz, J. Wu, W. Shan, J. W. Beeman, M. A. Scarpulla, O. D. Dubon, and P. Becla, Physical Review Letters **91**, 246403 (2003).
- ¹² A. Barnett, et al., Proceedings of the *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Milan, Italy, 2007), p. 95.
- ¹³ A. Shalav, B. S. Richards, T. Trupke, K. W. Kramer, and H. U. Gudel, Applied Physics Letters **86** (2005).
- ¹⁴ J. d. Wild, A. Meijerink, J. K. Rath, W. G. J. H. M. v. Sark, and R. E. I. Schropp, Proceedings of the *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009), p. 350.
- ¹⁵ G. Conibeer, R. Patterson, L. M. Huang, J. F. Guillernoles, D. Konig, S. Shrestha, and M. A. Green, Solar Energy Materials and Solar Cells **94**, 1516 (2010).
- ¹⁶ Y. Takeda, T. Ito, T. Motohiro, D. Konig, S. Shrestha, and G. Conibeer, Journal of

Applied Physics **105**, 10 (2009).

¹⁷ S. K. Shrestha, P. Aliberti, and G. J. Conibeer, Solar Energy Materials and Solar Cells **94**, 1546 (2010).

¹⁸ G. Conibeer, et al., Proceedings of the *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009), p. 178.

¹⁹ R. T. Ross and A. J. Nozik, Journal of Applied Physics **53**, 3813 (1982).

²⁰ R. D. Schaller and V. I. Klimov, Physical Review Letters **92** (2004).

²¹ R. J. Ellingson, M. C. Beard, J. C. Johnson, P. Yu, O. I. Micic, A. J. Nozik, A. Shabaev, and A. L. Efros, NANO LETTERS **5**, 865 (2005).

²² R. D. Schaller, M. Sykora, S. Jeong, and V. I. Klimov, The Journal of Physical Chemistry B **110**, 25332 (2006).

²³ R. D. Schaller, J. M. Pietryga, and V. I. Klimov, NANO LETTERS **7**, 3469 (2007).

²⁴ M. C. Beard, K. P. Knutsen, P. Yu, J. M. Luther, Q. Song, W. K. Metzger, R. J. Ellingson, and A. J. Nozik, NANO LETTERS **7**, 2506 (2007).

²⁵ A. Ueda, K. Matsuda, T. Tayagaki, and Y. Kanemitsu, Applied Physics Letters **92**, 233105 (2008).

²⁶ N. M. Gabor, Z. H. Zhong, K. Bosnick, J. Park, and P. L. McEuen, Science **325**, 1367 (2009).

²⁷ M. A. Green, Proceedings of the *15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference* Shanghai, China, 2005), p. 7.

²⁸ M. Zacharias, J. Heitmann, R. Scholz, U. Kahler, M. Schmidt, and J. Blasing, Appl. Phys. Lett. **80**, 661 (2002).

²⁹ M. A. Green, E. C. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, and A. Lin, Proceedings of the *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 2005), p. 3.

³⁰ Y. H. Cho, M. A. Green, E.-C. Cho, Y. Huang, T. Trupke, and G. Conibeer, Proceedings of the *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 2005), p. 47.

³¹ E. C. Cho, S. Park, X. Hao, D. Song, G. Conibeer, S. C. Park, and M. A. Green, Nanotechnology **19**, 245201 (2008).

³² Y. Kurokawa, S. Miyajima, A. Yamada, and M. Konagai, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 - Lett. Express Lett. **45**, L1064 (2006).

³³ Y. Kurokawa, S. Tomita, S. Miyajima, A. Yamada, and M. Konagai, Proceedings of the *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San diego, USA, 2008), p. 211.

³⁴ S. Yamada, Y. Kurokawa, S. Miyajima, A. Yamada, and M. Konagai, Proceedings of the *35th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 2010), p. to be published.

³⁵ M. Ficcadenti, et al., Proceedings of the *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 2008), p. 685.

³⁶ B. Rezgui, T. Nychporuk, A. Sibai, D. Bellet, M. Lemiti, and G. Brémond, Proceedings

- of the *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 2008), p. 696.
- ³⁷ D. Song, E. C. Cho, Y. H. Cho, G. Conibeer, Y. Huang, S. Huang, and M. A. Green, *Thin Solid Films* **516**, 3824 (2008).
- ³⁸ M. Künle, A. Hartel, and S. Janz, *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 2008), p. 421.
- ³⁹ C. Summonte, S. Mirabella, R. Balboni, A. Desalvo, I. Crupi, F. Simone, and A. Terrasi, *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 2008), p. 730.
- ⁴⁰ J. H. Moon, H. J. Kim, J. C. Lee, J. S. Cho, S. H. Park, B. O, E. C. Cho, K. H. Yoo, and J. Song, *Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Philadelphia, USA, 2009), p. 253.
- ⁴¹ R. S. Wagner and W. C. Ellis, *Applied Physics Letters* **4**, 89 (1964).
- ⁴² Y. Cui, L. J. Lauhon, M. S. Gudiksen, J. F. Wang, and C. M. Lieber, *Applied Physics Letters* **78**, 2214 (2001).
- ⁴³ N. Wang, Y. H. Tang, Y. F. Zhang, C. S. Lee, I. Bello, and S. T. Lee, *Chemical Physics Letters* **299**, 237 (1999).
- ⁴⁴ J. D. Holmes, K. P. Johnston, R. C. Doty, and B. A. Korgel, *Science* **287**, 1471 (2000).
- ⁴⁵ B. Sadeghimakki, M. Gharghi, and S. Sivoththaman, *Proceedings of the The 33rd IEEE PVSC*, San Diego, 2008), p. 256.
- ⁴⁶ H. I. Liu, N. I. Maluf, R. F. W. Pease, D. K. Biegelsen, N. M. Johnson, and F. A. Ponce, *Journal of Vacuum Science & Technology B* **10**, 2846 (1992).
- ⁴⁷ M. L. Zhang, K. Q. Peng, X. Fan, J. S. Jie, R. Q. Zhang, S. T. Lee, and N. B. Wong, *Journal of Physical Chemistry C* **112**, 4444 (2008).
- ⁴⁸ B. Z. Tian, X. L. Zheng, T. J. Kempa, Y. Fang, N. F. Yu, G. H. Yu, J. L. Huang, and C. M. Lieber, *Nature* **449**, 885 (2007).
- ⁴⁹ E. C. Garnett and P. D. Yang, *Journal of the American Chemical Society* **130**, 9224 (2008).
- ⁵⁰ O. Gunawan and S. Guha, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **93**, 1388 (2009).
- ⁵¹ M. Jeon and K. Kamisako, *Materials Letters* **63**, 777 (2009).
- ⁵² L. Tsakalakos, J. Balch, J. Fronheiser, B. A. Korevaar, O. Sulima, and J. Rand, *Applied Physics Letters* **91**, 233117 (2007).
- ⁵³ V. Sivakov, G. Andrä, A. Gawlik, A. Berger, J. Plentz, F. Falk, and S. H. Christiansen, *NANO LETTERS* **9**, 1549 (2009).
- ⁵⁴ F. Hui and et al., *Nanotechnology* **19**, 255703 (2008).
- ⁵⁵ D. D. D. Ma, C. S. Lee, F. C. K. Au, S. Y. Tong, and S. T. Lee, *Science* **299**, 1874 (2003).

太陽電池のデバイスシミュレーション

ーCIGS 太陽電池の最適設計ー

峯元 高志

立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (R-GIRO)

〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

minemoto@se.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

以下の 5 点に焦点を絞り、デバイスシミュレーションについて解説を行う。

- ・ どう役に立つのか？
- ・ どんな考えに基づいているのか？
- ・ どんなことに使われてきたのか？
- ・ どうやって手に入れるのか？
- ・ どうやって使うのか？

これらを理解するために、シミュレーションの目的 (2 章)、シミュレーションの基礎と限界 (3 章)、シミュレーション例 (4 章)、シミュレーションソフト (5 章) に分けて説明する。講演では、実際にシミュレーションを動作させて、簡単な使用方法とシミュレーション結果を実演する。

2. シミュレーションの目的

2. 1 シミュレーションの必要性

太陽電池の重要部 (心臓部) は非常に単純であり、ダイオードである。図 2.1 に示すように、単純な素子 (例えば、単純な構成の結晶シリコン太陽電池) の場合は、テキストで説明されているような式でバンドベンディングや IV 特性、QE を計算することができる。しかし、最近の高効率な結晶シリコン太陽電池 (パッシベーション膜やヘテロ接合を有するもの) では、計算は容易ではない。また、図 2.1 の右に示すように、薄膜太陽電池では構成が複雑でなる。この Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) 太陽電池の例のように、各層のバンドギャップ (Eg) や電子親和力などの物性値が異なり、また光吸収層である CIGS 内で Eg のグレーディングがあるような場合には、単純には計算できず、また直感ではわからない動作をする。たとえば、初期の CuInSe_2 単結晶太陽電池の論文[1]では、「高効率化には、窓層 (あるいはバッファ層) と光吸収層間の伝導帯にスパイクがあってはならない」と書かれてある。直感的にはスパイクは光電流の妨げになるように感じるが、実際にはスパイクの大きさに

最適値が存在し高効率化に有利であり、逆にクリフでは効率が低下することが理論計算で示されている[2]。こういった直感とは異なる動作を見極めるためにもシミュレーションは重要である。

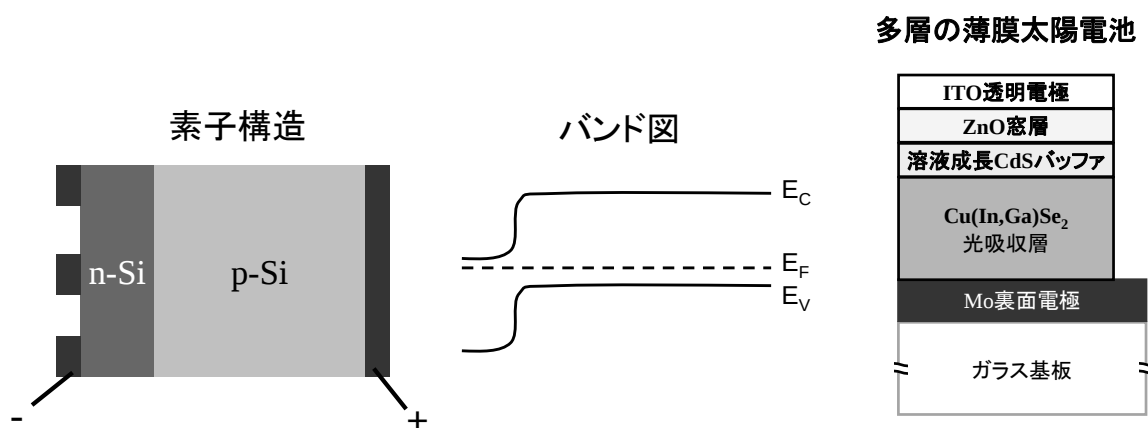


図 2.1 簡略化した結晶シリコン太陽電池と多層構造の CIGS 太陽電池の模式図

2. 2 シミュレーションがどんなことに役立つか

シミュレーションはあくまで“模擬”であり、次章以降で述べるように限界があるものの、主に以下の①～④に利用できる。

① デバイスの設計ができる

例えば、結晶シリコン太陽電池の場合には、基本的な設計として、結晶シリコンバルク（ベース）の抵抗率やライフタイム、エミッタ層のシート抵抗、膜厚がデバイス特性に与える影響を見ることができる。また、反射防止膜やテクスチャリングによる光学シミュレーションを組み込んだものもあり、これらの光学設計もできる。特に、薄肉化が期待されている結晶シリコン太陽電池では、バルクの膜厚と反射防止膜が変換効率に与える影響を見ることができる[3]。また、金属汚染量によってどの程度ライフタイムが減少するのかを予め計算し、その計算値をシミュレーションに組み込むことによって、金属汚染量とデバイス特性の相関をみることもできる[4]。また、カウンタードーピングなど、様々な仮定をうまくモデル化することによって、現状の様々な課題を模擬することができる。

例えば、CIGS 系や CdTe[5]薄膜太陽電池の場合には、基本的な設計として、各層の膜厚、キャリア密度、ライフタイム、 E_g が、デバイス特性に与える影響を見ることができる。特に、Cd フリー構造を実現したい場合のバッファ層の設計（本稿 4 章で紹介）[2]や、CIGS 中での E_g 分布の影響[6]をみることができる。

もちろん、物性値さえ分かれば新材料を用いた新型太陽電池でもシミュレーションできる。

② 物性値をフィッティングで推定できる

例えば、アモルファスシリコン太陽電池や微結晶シリコン太陽電池において、移動度・ライフタイム ($\mu \tau$) 積を変えた場合の量子効率をシミュレーションし、それを実デバイス

の結果と比較して、 $\mu \tau$ 積を見積もることができる。

③ 実デバイスとの比較を行うことで効率向上のボトルネックを探ることができる

④ 太陽電池の動作の理解に役立つ

3. シミュレーションの基礎と限界

3. 1 シミュレーションの考え方（格子点分割）

図 3.1 に示すように半導体デバイス（太陽電池）の深さ方向に、格子点（node）を分配する。格子点をデバイスの深さ方向（つまり 1 次元）のみに割り振ったものを 1 次元デバイスシミュレータという。アモルファスシリコン、微結晶シリコン、CdTe、CIGS 太陽電池などの薄膜太陽電池では、主に膜厚方向のみにキャリアが流れるため 1 次元で十分である（少数キャリアの拡散長が数ミクロン以下であるため、面内方向のキャリアの流れを積極的に考える必要がない）。ただし、結晶粒界の影響を考慮するために 2 次元でシミュレーションした例もある[7]。

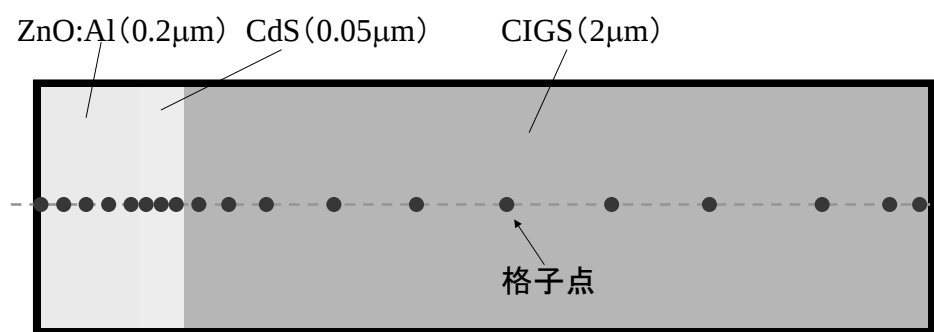


図 3.1 シミュレータ中での格子点分割のイメージ（CIGS 太陽電池の場合）

大まかなシミュレーションの流れは以下である。何層から構成されるかを決定し、次に格子点（深さ方向の位置を決める）を配置する。界面では計算値（電位、キャリア密度等）が大きく変化しやすいので、多めに格子点を配置する。この格子点ごとに、各層の物性値を割り振る。物性値の例としては、誘電率、電子・正孔の有効質量、電子・正孔の移動度、電子親和力、 E_g 、電子・正孔のライフタイム、光吸収係数（光の波長毎）、キャリア密度、欠陥密度のエネルギー分布などである。その他にも境界条件として、表面・裏面再結合速度や、表面・裏面での反射率を設定する。こういった初期の物性値を入力後、デバイスに光を照射させる。（この光のスペクトルを変えることによって、AM1.5G の基準太陽光の他にも、太陽電池の照度特性、大気圏外での発電特性、世界各地に対応するスペクトル下での動作も模擬できる。）入射させる光の波長毎のフォトン密度によって、表面側から過剰少数キャリアを光吸収係数に対応させて生成させる。その後、移動度、ライフタイム、欠陥密度等の物性値からキャリア再結合を計算する。太陽電池の性能を計算するには、IV 特性を描く。V=0 のときの電流値を計算し、順次電圧を増加した場合の電流値を計算し、IV カ

ーブを描き、これから太陽電池パラメータ（効率、 J_{sc} 、 V_{oc} 、 FF ）を計算する。また、量子効率を描くには、 $V=0$ の場合で、各入射波長で得られる電流値を入射光子に対応する電流値で除算することで得ることができる。こういった一連の計算を、以下の 3. 2 で示す方程式を各格子点においてセルフコンシステントに解くことによって実行する。

3. 2 基本の方程式

半導体内のキャリア輸送を支配する基本方程式は、ヘテロ接合、ホモ接合に関わらず、ポアソン方程式、電流連続方程式である。これらはマクスウェル方程式から導かれる。ポアソン方程式はデバイス内の電位分布を記述するものであり、電子電流連続方程式と正孔電流連続方程式はそれぞれ電子電流と正孔電流の保存式である。太陽電池に関するシミュレーションでは時間項を無視した定常解析で十分であるので、基本方程式は次式で与えられる。

$$\text{ポアソン方程式} \quad \nabla \cdot (\epsilon \nabla \psi) = -q(p - n + N_D - N_A)$$

$$\text{電子電流連続方程式} \quad \nabla \cdot \mathbf{J}_n = -q(G - R)$$

$$\text{正孔電流連続方程式} \quad \nabla \cdot \mathbf{J}_p = q(G - R)$$

ここで、 ϵ は誘電率、 ψ は電位、 q は素電荷、 N_D はドナー密度、 N_A はアクセプタ密度、 G は単位時間当たりが発生する電子・正孔密度、 R は単位時間当たり再結合する電子・正孔密度である。また、 $n, p, \mathbf{J}_n, \mathbf{J}_p$ はそれぞれ電子密度、正孔密度、電子電流密度、正孔電流密度である。その他の方程式の詳細や、方程式の規格化、線形化、離散化については、参考書[8]に譲る。

3. 3 シミュレーションの限界と特有の仮定

・物性値の整合性

各層の物性値は、通常、シミュレータ内で特別な関係を持たせていない場合には、独立に設定されている。以下で紹介する PC1D では結晶シリコンのキャリア密度と移動度をリンクさせているが、他の物性値や他のシミュレータではその都度、確認する必要がある。注意しないと現実とは大きく異なる結果が出ることになるので注意が必要である。たとえば、光吸収層の E_g を変えた場合のシミュレーションをする場合、他の物性値も E_g にリンクして変化させる必要がある。特に、 E_g の変化に伴い、光吸収係数を変化させないと、吸収端よりも低エネルギーの光を吸収するといった、現実ではありえない仮定で計算してしまうこともある。こういったことは、シミュレータを使いたての初心者によくみられるので、シミュレータの仕組みの理解は重要である。

・界面再結合

シミュレータにもよるが界面の再結合を考慮できない場合がある。たとえば、ヘテロ接合で、窓層と光吸収層のバンド図が図 3.2 のような関係にある場合を考える。実際のデバイスでは、窓層（左側）の伝導帯の電子と光吸収層（右側）の価電子帯の正孔が界面欠陥を介して再結合しうる。ただし、特別な仮定をおいていない限りは、電子-正孔の再結合は、同格子点でのみ計算されるため、シミュレーションではこの再結合を計算できない。この場合には、図 3.2 の右図に示すような仮想の層を導入することで、この再結合を模擬することができる。

・トンネル接合

p^+ 型と n^+ 型の接合では通常はトンネル再結合が起こりうる。この場合も上記の界面再結合の場合と同様に特別な仮定をおいていない限りは計算できないために、上記と同様に仮想の層を導入することで、模擬できる。

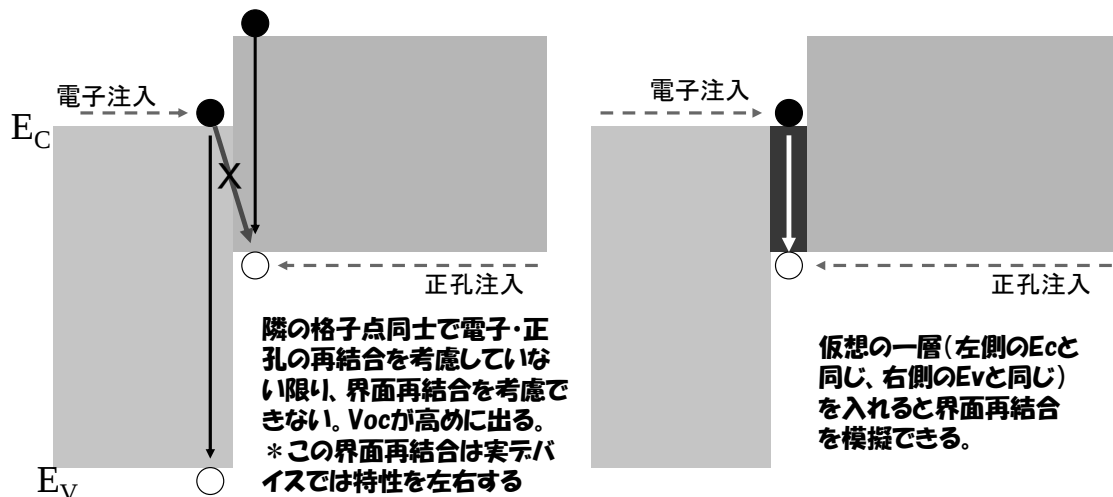


図 3.2 界面再結合を模擬する方法

4. CIGS 太陽電池のシミュレーション例

高効率な CIGS 太陽電池の窓層（あるいはバッファ層と呼ぶ場合もある）には、CdS が用いられている。環境負荷低減の観点から Cd を用いないバッファ（Cd フリーバッファ）が開発されているが、いまだに CdS バッファを用いた CIGS 太陽電池が最も高効率である。CdS が優れている原因は複数あるが、その重要なものに CIGS との伝導帯不連続量（Conduction band offset: CBO）が整合しているということが挙げられる。本節では、筆者のグループが行った CBO に対する各太陽電池パラメータの変化について紹介する[2]。図 4.1 にシミュレーション中での太陽電池構造のモデル図を示す。CIGS 表面には Cu 欠損層（Ordered Vacancy Compound: OVC）を考慮している。窓層の伝導帯が CIGS のそれよりも高い場合を CBO が正、逆の場合を負としている。表 4.1 には本計算で入力した物性値

の一覧を示す。図 4.2 に CBO が各太陽電池パラメータに与える影響を示す。CBO が $0.0 \sim +0.4\text{eV}$ (つまり、窓層と CIGS の界面で伝導帯がフラットあるいはスパイクができてい) のときに、高い効率が得られることが示された。直感ではスパイクは光生成電子に対するバリアとして働くように思えるが、計算上は 0.4eV 以下であれば大きな妨げにならないことが示されている。このように、直感ではわかりにくい場合にもシミュレーションは役立つといえる。

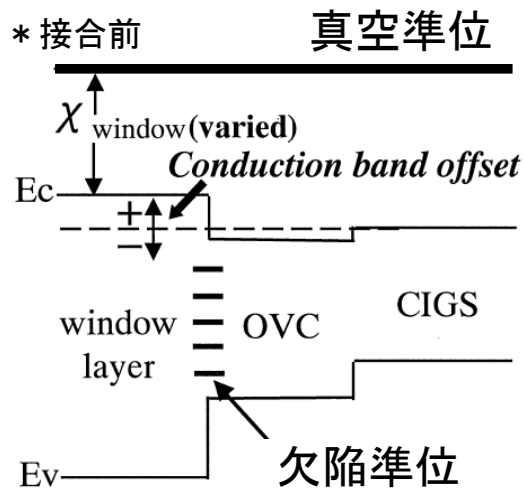


図 4.1 シミュレーションのモデル図[2]

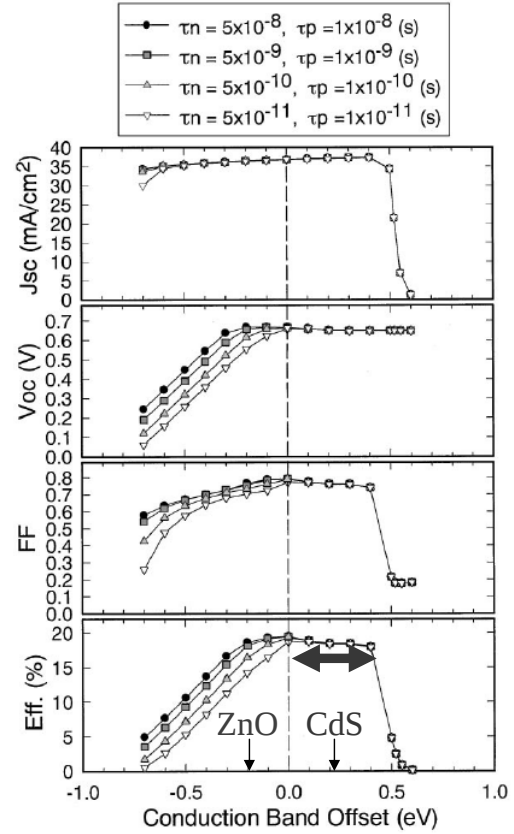


図 4.2 伝導帯不連続量と変換効率

表 4.1 物性パラメータ[2]

	p-CIGS	n-OVC	n-Window layer
Dielectric constant (C/V m)	$13.5 \times \epsilon_0$	$13.5 \times \epsilon_0$	$7.9 \times \epsilon_0$
Effective mass of electron	$0.09 \times m_0$	$0.09 \times m_0$	$0.32 \times m_0$
Effective mass of hole	$0.73 \times m_0$	$0.73 \times m_0$	$0.27 \times m_0$
Mobility of electron (cm/V s)	40	40	180
Mobility of hole (cm/V s)	10	10	20
Electron affinity (eV)	$4.35 - 0.421x - 0.244x^2$	$4.37 - 0.415x - 0.240x^2$	Variable
Bandgap (eV)	$1.011 + 0.421x + 0.244x^2$	$1.193 + 0.415x + 0.240x^2$	3.2
Life time of electron (s)	1×10^{-8}	1×10^{-8}	5×10^{-8}
Life time of hole (s)	5×10^{-8}	5×10^{-8}	5×10^{-9}
Light absorption coefficient (m^{-1})	$6.9 \times 10^{15} \times ((hc/\lambda) - E_g)^{1/2}$	$6.9 \times 10^{15} \times ((hc/\lambda) - E_g)^{1/2}$	0
Carrier density (cm^{-3})	1×10^{16}	1×10^{16}	1×10^{15}

^a Here, ϵ_0 is electric constant, m_0 is effective mass of a stand still electron, x is Ga/(In + Ga) ratio in CIGS, h is planck's constant, c is velocity of light, λ is wavelength and E_g is a band gap.

5. シミュレーションソフト

5. 1 シミュレーションソフトの種類

以下のようなソフトが各研究機関からリリースされている。

PC1D: The University of New South Wales (オーストラリア) (Paul Basore)

SCAPS: University of Gent (ベルギー) (Burgelman, Niemegeers, Degraeve)

AMPS: Pennsylvania State University (アメリカ) (Stephen Fonash)

ASA: University of Delft (オランダ) (Miro Zeman)

ADEPT: Purdue University (アメリカ) (Jeff Gray)

SC-SIMUL: University of Oldenburg (ドイツ) (Rudi Bruggemann, Max Rosch)

AFORS-HET: HMI-Berlin (ドイツ) (Froitzheim et al.)

ASPIN: University of Ljubljana (スロベニア) (Marko Topic)

NSSP: 富山県立大学+立命館大学 (H. Takakura and T. Minemoto)

特に、表 5.1 に PC1D、AMPS、SCAPS の特徴をまとめる。

結晶 Si 系太陽電池には、特に PC1D が使いやすい。PC1D では表面の反射防止膜の設定やテクスチャリングも考慮に入れることができる。また、結晶シリコンの物性値（抵抗率と移動度の関係等）も入力されており、簡単に表示できるので、簡単な計算にも参照できる。薄膜シリコン系太陽電池（特にタンデムや3スタックなど）では、AMPS がよく用いられる。APMS では計算できる層数が多いのが特徴である。3スタックや4スタックとなると、シミュレーションソフトは AMPS 以外ではなかなか無い。

CIGS 系太陽電池には、欧州を中心に SCAPS がよく用いられている。最近ではバンドギャップグレーディングも考慮に入れられるようになっている。容量－電圧や容量－周波数特性も計算できる。また、計算手法の面だけでなく、ユーザーインターフェースも定期的に改善されている。本稿では特に PC1D と SCAPS の簡単な使い方を紹介する。他のソフトももちろん優れているので、詳細は各自 HP 等で調べていただきたい。

表 5.1 各種シミュレータの比較

	PC1D	SCAPS	AMPS
層数	5	7	30
バンドギャップグレーディング	NO	YES	NO
深い欠陥準位（バルク）	NO	3	50
深い欠陥準位（界面）	NO	YES	NO
深い欠陥準位の帯電	NO	YES	YES
他の測定	—	C-V, C-f	—
計算速度	◎	○	△
ユーザーフレンドリーさ	◎	◎	○

*ただし、改善により変更の可能性あり

5. 2 PC1D

入手方法： <http://www.pv.unsw.edu.au/links/products/pc1d.asp> から入手できる。

価格：フリー（以前は 100 ドル程度だった。その他の利用の詳細については HP を参照）

適した太陽電池：結晶シリコン太陽電池。アモルファスシリコンや微結晶シリコンには、 E_g 内の欠陥密度分布を考慮に入れることができないため、お勧めしない。CdTe 薄膜太陽電池の場合はドーピングのグレーディングを入れないで良いならば使える。CIGS では層数が足りないのでお勧めしない。

使用方法：まずは、デフォルトのパラメータセットを用いて練習を始めることをお勧めする。PC1D では結晶シリコン太陽電池のデフォルトがある。

図 5.1 に PC1D のパラメータ設定画面を示す。左から 2 個目のアイコン（フォルダを開けるような絵）をクリックしたのちに、Pvcell.prm を選ぶ。（ただし、デフォルトの設定値は、あくまでもこのシミュレータが作製・改定された時期に考えられているものなので、自ら確認の方がよい。）

面積 100cm^2 、表面テクスチャあり、膜厚 $300\mu\text{m}$ 、 n^+p 構造、ベースのキャリア密度は 10^{16}cm^{-3} というスタンダードなものである。右から 8 個目のアイコン（人が走っているような絵）をクリックすると、計算する。結果は、画面下の RESULTS のところに表示される。ただし、 J_{sc} ではなく面積をかけた I_{sc} が表示されること、効率ではなく電力が表示されること、FF が表示されないことに注意する必要がある。これらを求めたい場合には、別途計算する必要がある。右から 4 個目のアイコン（グラフが 4 個書いているような絵）をクリックすると IV カーブやバンド図などの結果が表示される。詳細は講演で実演する。

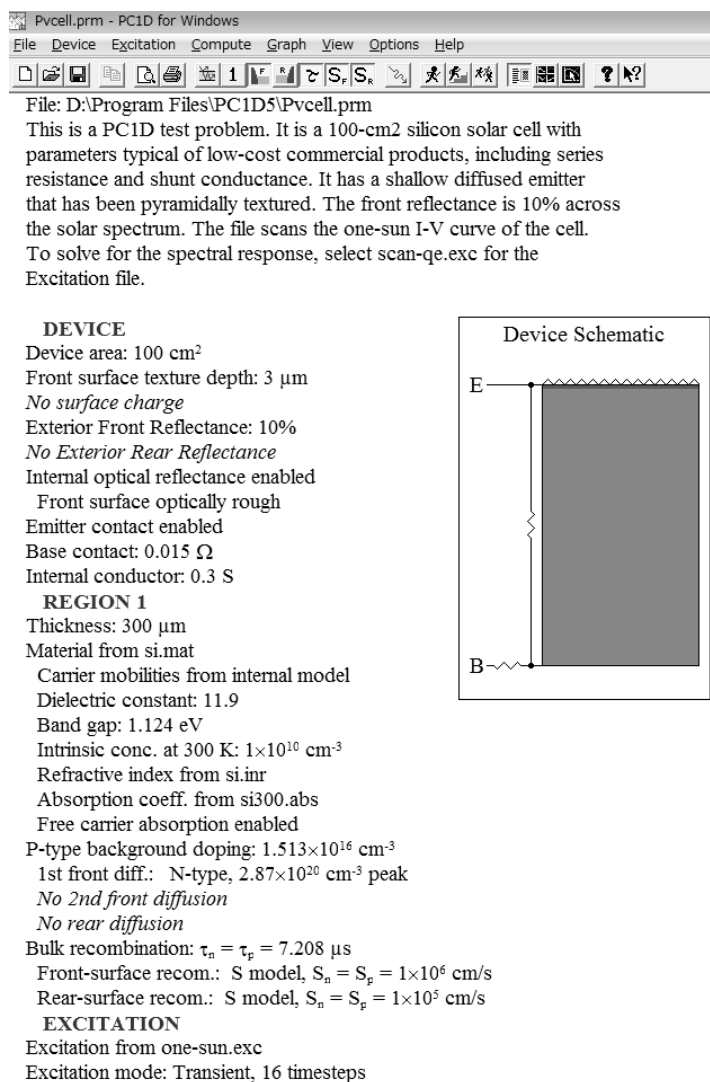


図 5.1 PC1D のパラメータ設定画面

5. 3 SCAPS

入手方法：開発者の Marc Burgelman 博士に E メールでソフトが欲しい旨を伝える。E メールでのやりとりのあと、入手方法が知らされる。詳細は、以下のアドレスにアクセス。

<http://trappist.elis.ugent.be/ELISgroups/solar/projects/scaps.html>

価格：フリー（発表時には謝辞を書く等のリクエストがあるので、詳細は HP を参照。）

適した太陽電池：CdTe、CIGS、アモルファスや微結晶シリコンなどの薄膜太陽電池。

使用方法：まずは、デフォルトのパラメータセットを用いて練習を始めることをお勧めする。SCAPS では結晶シリコン、CdTe、CIGS のデフォルトが用意されている。（ただし、デフォルトの設定値は、あくまでもこのシミュレータが作製・改定された時期に考えられているものなので、自ら確認する方がよい。）。ここでは CIGS の例を用いて説明する。図 5.2 に計算条件設定画面を示す。SCAPS を立ち上げたときにはこの画面が表示される。赤い”set program”ボタンをクリックする。図 5.3 に示すような画面が表示されるので”load”



図 5.2 計算条件設定画面

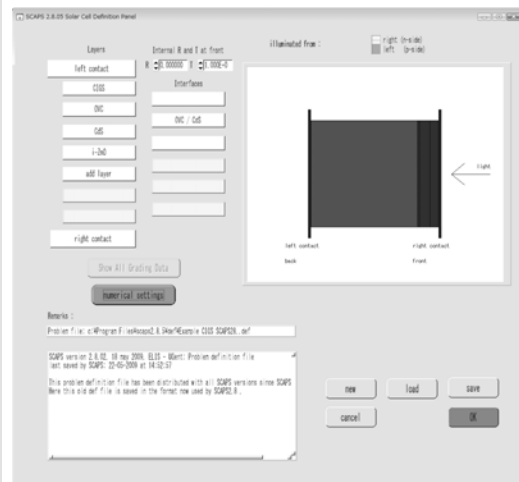


図 5.3 層構造入力画面

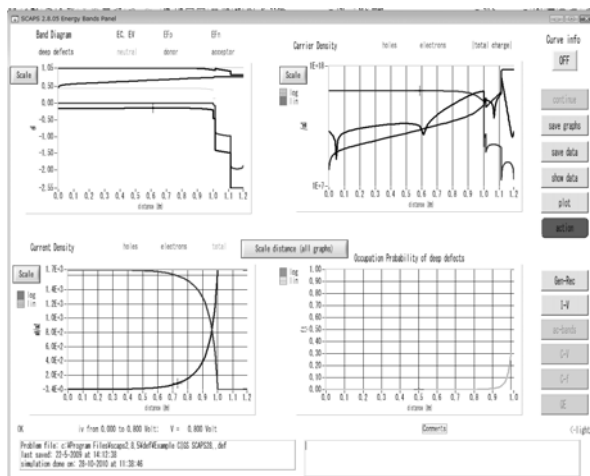


図 5.4 バンド図等の計算結果出力画面

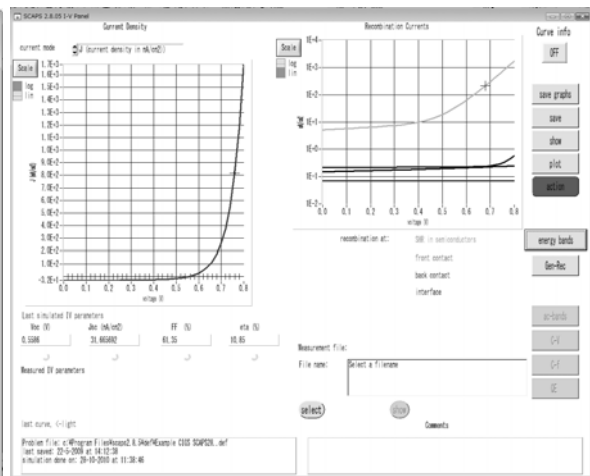


図 5.5 IV カーブ計算結果出力画面

ボタンをクリックし、Example CIGS SCAPS28..def を選び、物性パラメータを読み込み、“OK”ボタンをクリックする。計算条件設定画面に戻るので、ここで Illumination のところで“Light”を ON にする。次に、例えば IV 特性を見たい場合には Action のところの Current-Voltage にチェックを入れる。次に赤い“calculate”ボタンを押して計算する。図 5.4 のようなバンド図などの画面が表示されるので、計算が終わった後に、“IV”ボタンをクリックすると図 5.5 に示すような IV カーブが表示される。詳細は、講演で実演する。

6. 最後に

シミュレーションを用いる際には、以下のことを心に留めるべきである。

- ・計算の前提を知り、シミュレーションの限界を知る必要がある
- ・各太陽電池に適したシミュレータを使ったほうがよい（比較したほうがよい）
- ・定量的な計算はできるが、絶対値は実験値で補正する必要がある
- ・傾向を定性的に見ることに優れている
- ・効率改善のキーパラメータを見つけることは可能である
- ・シミュレーション単独での議論は危険である（可能性の示唆にとどめるべき）

シミュレーションは現状のデバイス設計だけでなく、今後の低コスト・高効率な新型太陽電池の開発にも有用であるため、動作の理解を深める為にも積極的に利用すべきであろう。

参考文献

- [1] J.L. Shay, S. Wagner, H. M. Kasper: Efficient CuInSe₂/CdS solar cells, Appl. Phys. Lett. 27 (1975) 89.
- [2] T. Minemoto, T. Matsui, H. Takakura, Y. Hamakawa, T. Negami, Y. Hashimoto, T. Uenoyama, M. Kitagawa: Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 67 (2001) 83.
- [3] C. J. J. Tool, y A. R. Burgers, P. Manshanden, A. W. Weeber and B. H. M. van Straaten: Influence of Wafer Thickness on the Performance of Multicrystalline Si Solar Cells: an Experimental Study, Prog. Photovolt. 10 (2002) 279.
- [4] J. Schmidt: Effect of Dissociation of Iron–Boron Pairs in Crystalline Silicon on Solar Cell Properties, Prog. Photovolt. 13 (2005) 325.
- [5] M. Burgelman, J. Verschraegen, S. Degraeve and P. Nollet: Modeling Thin-film PV Devices, Prog. Photovolt. 12 (2004) 143.
- [6] C. H. Huang, S. S. Li, T. J. Anderson: Device modeling and simulation of CIS-based solar cells. Conference Record, 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans LA, May 2002; 748–751.
- [7] M. Gloeckler, J. R. Sites, W. K. Metzger: Grain-boundary recombination in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells, J. Appl. Phys. 98 (2005) 113704.
- [8] 壇 良：プロセス・デバイス・シミュレーション技術、産業図書（1988）、第3章。

CIGS 太陽電池における欠陥準位評価法（電気・光学測定）の紹介

櫻井岳暁

筑波大学 大学院数理物質科学研究科

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

1 本講演の目的

CIGS 薄膜中に存在する欠陥は、光生成キャリアの捕獲準位や再結合中心として働き、太陽電池特性に悪影響を及ぼす。よって、CIGS 薄膜の欠陥準位を同定しこれを制御することが可能になれば、CIGS 太陽電池のデバイス特性を改善するための指針を得ることができる。ただし、CIGS 太陽電池は (i) 多結晶薄膜、(ii) 4 元系混晶、(iii) デバイス構造が複雑 (図 1) という複数の要素により、欠陥準位を同定するのが困難である。さらに、CIGS 薄膜に存在する欠陥準位は、熱やバイアス電圧のストレスに対する安定性に乏しく¹⁾、通常の半導体の欠陥準位検出に用いられる電氣的評価法 (例えば DLTS 法²⁾) の使用が難しい。そのため、CIGS 太陽電池における欠陥準位を評価するためには、独特な電気・光学測定法を利用する必要がある。

本講演では、CIGS 太陽電池に有用な電気・光学測定法である、アドミッタンススペクトロスコピー法 (Admittance Spectroscopy) と光容量過渡分光法 (Transient Photo-Capacitance Spectroscopy) を中心に紹介する。

2 アドミッタンススペクトロスコピー法

2.1 測定原理

アドミッタンススペクトロスコピー法は、測定試料への印加電圧を一定に保ちながら電気容量の周波数応答を観測し、これを解析することにより欠陥準位を検出する手法である。電気容量の周波数応答は、欠陥準位と価電子帯 (伝導帯) 間で起こるキャリアの充放電過程に対応するため、試料温度を変化させながらこれを観測・解析することにより、欠陥準位密度スペクトルを計測することが可能になる。アドミッタンススペクトロスコピー法の測定系は温度可変の可能なクライオスタット、電気容量測定装置

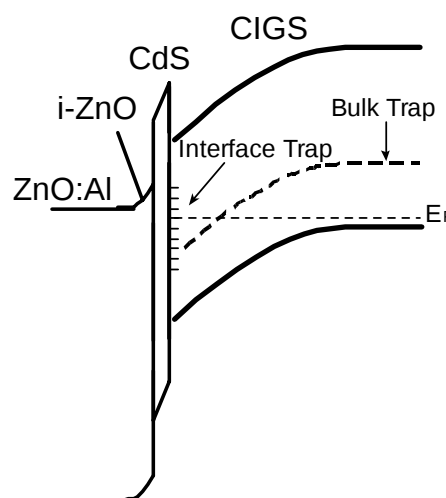


図 1 . CIGS 太陽電池のバンド図

(インピーダンスアナライザ)と信号処理用 PC という単純な装置群で構成されており、容易に構築することが可能である。ただし、CIGS 薄膜には多元材料の制御の難しさ³⁾や複雑な電気応答特性^{1,4)}が存在するため、信頼性のあるデータを取得するにはデータの蓄積が必要になる。本稿では、測定原理を直感的に理解できるように、単純な構造を有する p 型のショットキー接合 (図 2(a)) を例にとり、測定原理と解析手法について簡潔に述べる。

図 2(a)のショットキー接合において欠陥準位 E_T とフェルミ準位 E_F が交差した位置では、正孔が欠陥準位を部分的に占有している。このショットキー接合に微小な変調電圧を加えると、フェルミ準位のエネルギー位置が微小に変化し、これに伴い欠陥準位 E_T と価電子帯 E_V との間で正孔の捕獲・放出 (充放電) が行われる。この充放電過程を、Shockley-Read-Hall 統計⁵⁾と小信号近似⁶⁾に基づき等価回路を用いて表すと、図 2(b)に示すような空乏層容量と欠陥準位から成る単純な並列回路で置き換えられる。この時、回路全体のアドミッタンスは

$$Y = \frac{C_T \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + j\omega \left(C_\infty + \frac{C_T}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) = G_p + j\omega C_p \quad (1)$$

で表され、図 2(b)は図 2(c)の等価回路で置き換えられる⁶⁾。ここで、 G_p は並列コンダクタンス、 C_p は並列容量である。

実際の測定では、周波数応答のない半導体の空乏層容量 C_∞ と周波数応答がある欠陥準位の電気容量 $C_T / (1 + \omega^2 \tau^2)$ の和を、系全体の電気容量 C_p として検出する。従って、周波数応答する成分 $C_T / (1 + \omega^2 \tau^2)$ を C_p から抽出することにより、欠陥準位の充放電過程を図 2(d)のようにモニターできるようになる。この変化を定性的に説明すると、印加する交流電圧が低周波の場合、電圧の変調に欠陥準位からの正孔の充放電が追従し C_T が検出されるのに対し、印加する交流電

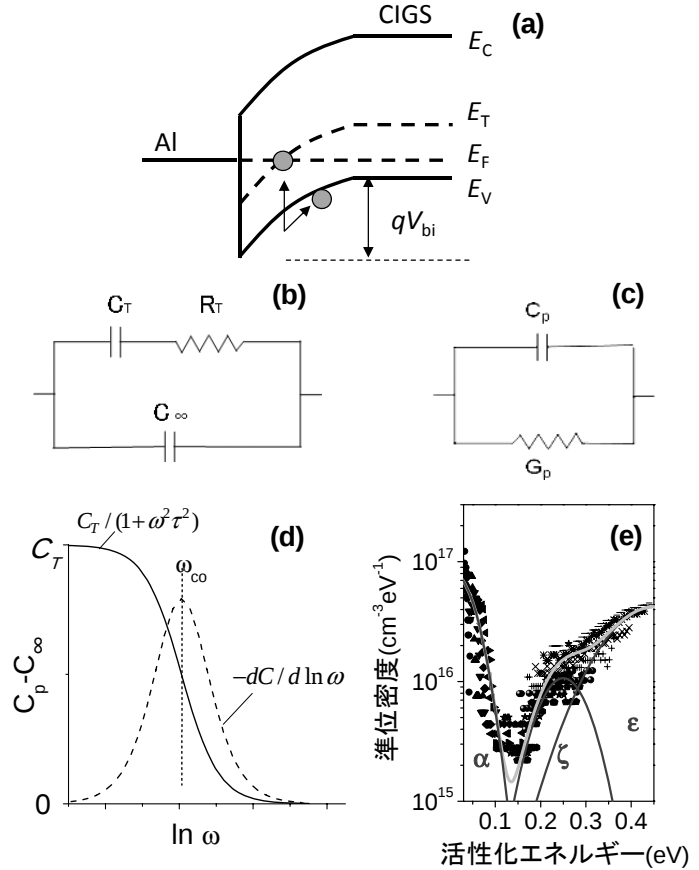


図 2 . (a) p 型半導体ショットキー接合のバンド図、(b)(c) 単一の欠陥準位を有するショットキー接合の等価回路、(d) 電気容量の周波数応答曲線、(e) 欠陥準位密度スペクトル

圧が高周波の場合、電圧の変調に正孔の充放電が追従できなくなり C_T が検出されなくなる。

ここで、重要なパラメーターに遮断角周波数 ω_{CO} がある。遮断角周波数はキャリアの充放電が追従できる限界の周波数を表し、

$$\omega_{CO} = 2e_T = \xi_0 T^2 \exp(-E_A / kT) \quad (2)$$

で表される⁷⁾。ここで、 e_T は欠陥準位に捕獲された正孔の価電子帯への放出係数、 E_A は欠陥準位の活性化エネルギー、 ξ_0 は温度に依存しない係数である。これより、試料温度を変化させながら ω_{CO} を観測し、アレニウスプロットを作成すると、その傾きから活性化エネルギー E_A を見積もることができる。また、 ω_{CO} は電気容量の周波数微分 $-dC / d \ln \omega$ の極大点からも求めることができ(図2(d)) さらに $-dC / d \ln \omega$ は欠陥準位密度に対応して増減する。

一方、実際の CIGS 太陽電池における欠陥準位密度の測定では、少数キャリアトラップ、空乏層のバンドの曲がり、応答する欠陥準位の深さ、キャリア分布など、さらに多くの要素を考慮する必要がある。これらを考慮し、定量的に欠陥準位密度スペクトル $D_T(E)$ を求める式が Stuttgart 大より提唱されている⁷⁾。

$$D_T(E_A) = -\frac{1}{kT} \frac{2V_{bi}^{3/2}}{w\sqrt{q}\sqrt{qV_{bi} - (E_g - E_A)}} \cdot \frac{dC}{d \ln \omega} \quad (3)$$

ここで、 E_A は欠陥準位の活性化エネルギー、 w は空乏層幅、 V_{bi} は内蔵電位、 E_g はバンドギャップである。このうち既知のパラメーター(E_g)と電気容量-電圧(C-V)測定から求めることができる空乏層幅 w や内蔵電位 V_{bi} を用い、電気容量の周波数微分 $-dC / d \ln \omega$ に基づきアドミッタンススペクトルを解析すると、欠陥準位密度を見積もることができる(図2(e))。

2.2 CIGS 薄膜の製膜時 Se 圧依存性と欠陥準位密度⁸⁾

アドミッタンススペクトロスコピー法を用いた欠陥準位の解析例として、三段階法での CIGS 薄膜の製膜時における Se 圧依存性に関する実験結果を紹介する。この製膜工程は、三段階法の各段階における Cu、In、Ga の流束条件を固定し、Se 圧 (Se Beam Equivalent Pressure : Se BEP) だけセル温度を変えながら制御した。図3に CIGS 太陽電池 (Ga/III 族比 = 0.45 (III 族は In+Ga)) の変換効率の Se 圧依存性を示す。これより、製膜時の Se 圧を最適条件の約 5×10^{-3} Pa から減らすと、変換効率が低下する傾向がわかる。Se 圧は構成元素の拡散や結晶成長過程に影響を及ぼすことが知られており⁹⁻¹¹⁾、Se 圧が減少すると薄膜中に Se 欠損が導入され太陽電池特性の劣化を促すことが予想される。

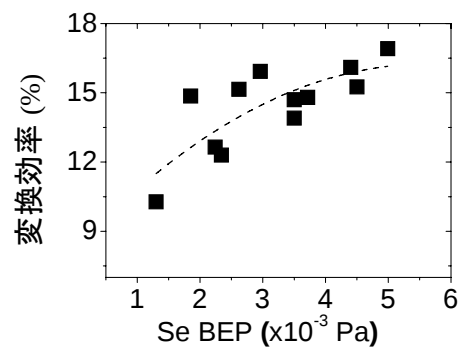


図3 . Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂太陽電池 ($x \sim 0.45$) の変換効率の Se 圧 (Se BEP) 依存性

Se 圧が CIGS 薄膜中の欠陥準位の形成に与える影響を調べるため、アドミタンススペクトロスコピー法により決定した欠陥準位密度スペクトルを図 4(a)に示す。これより、全ての試料について、活性化エネルギー約 20、150、300 meV の捕獲準位 α 、 β 、 ζ が形成されることがわかる。この捕獲準位と C-V 特性の相関を系統的に調べることににより、 α はアクセプタ準位、 β は CdS 薄膜もしくは CdS/CIGS 界面に起因した準位、そして ζ がアクセプタ性の欠陥準位であることが明らかになった¹²⁾。図 4(a)の欠陥準位スペクトルから各欠陥準位密度を抽出したものを図 4(b)に示す。これより準位 α 、 β は Se 圧に依存せずほぼ一定の密度を示すのに対し、欠陥準位 ζ だけが Se 圧の減少に伴い密度が増大する様子が分かる。従って、この欠陥準位 ζ は Se 欠損に起因した準位であることが判明した。さらに、これを変換効率の Se 圧依存性と関連させると、欠陥準位 ζ は太陽電池特性に影響を与える欠陥準位であることが予想される。なお、通常 Se 空孔は活性化エネルギー約 80 meV のドナー準位であることがよく知られており¹³⁾、単独の Se 空孔が欠陥準位 ζ の起源であることは想像し難い。

図 5 に薄膜中での Se/III 族比と Cu/III 族比 (III 族 = In+Ga) の Se 圧依存性を示す。これより、Se 圧の減少に伴い、Se/III 族比だけでなく Cu/III 族比も同時に減少する様子が分かる。続いて図 6 に CIGS 太陽電池のバンド端近傍の光容量スペクトル (光イオン化スペクトル) を示す。これより、Se 圧が 1.3×10^{-3} Pa まで低下すると、光吸収端 (バンド端) のエネルギー位置が約 0.15 eV 高エネルギー側にシフトする様子が分かる。なお、

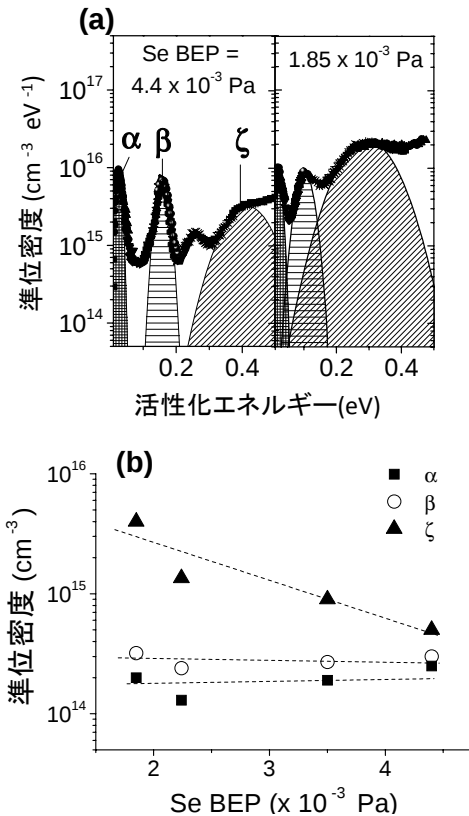


図 4 (a)CIGS 太陽電池の欠陥準位密度スペクトル、(b)捕獲準位 α 、 β 、 ζ の Se 圧依存性

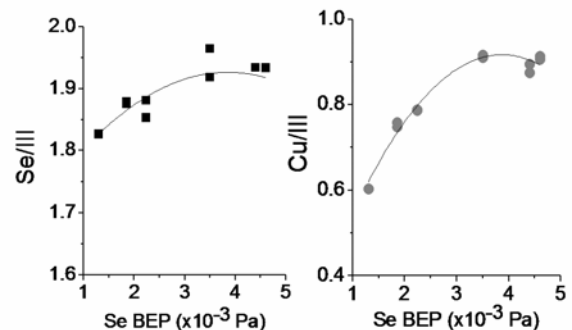


図 5 . CIGS 薄膜の組成 (Se/III 族比、Cu/III 族比) の Se 圧依存性

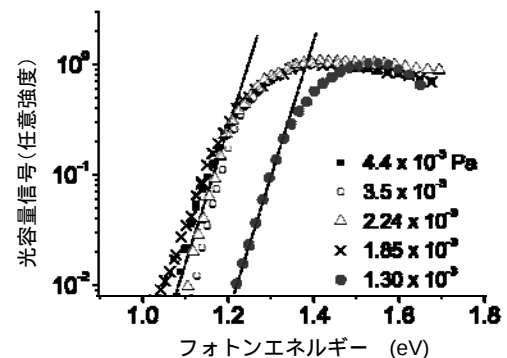


図 6 . 光容量スペクトルの Se 圧依存性

バンド端の高エネルギー側へのシフトは Cu/III 族比が 0.7 以下になると起こることが知られており、Cu(In,Ga)₃Se₅ 相の形成によるものと結論付けられている¹⁴⁾。また、図 6 に示した結果は図 5 に示した Cu/III 族比とも対応しており、さらに X 線回折の Rietvelt 解析によっても同様の傾向が確認された¹⁵⁾。従って、CIGS 薄膜の製膜時における Se 圧の減少は、Se 欠損だけでなく Cu 欠損の形成も同時に促すことが明らかになった。

以上の実験結果より、欠陥準位の起源について考察する。Lany と Zunger の計算によれば、Se と Cu の複空孔 ($V_{Se}-V_{Cu}$) は、Se 空孔 (V_{Se}) と Cu 空孔 (V_{Cu}) が孤立して形成されるよりもエネルギー的に安定である¹⁶⁾。さらに、 $V_{Se}-V_{Cu}$ は +1 価から -1 価への遷移が $E_V+0.2\sim0.3$ eV の位置で起こり、アクセプタの性質を有する欠陥であることが示された¹⁶⁾。一方、仁木らの陽電子消滅に関する実験結果では、Cu/III 族比が 0.9 より低下した試料において $V_{Se}-V_{Cu}$ の形成が促される様子が示されており¹⁷⁾、本結果と矛盾しない。以上の結果より、欠陥準位の起源の有力な候補として $V_{Se}-V_{Cu}$ が挙げられる。ただし、Cu(In,Ga)₃Se₅ 相の形成に伴うアンチサイト欠陥の形成などの可能性も残されており、欠陥種の同定にはさらなる研究が必要となる。

以上のように、アドミタンススペクトロスコピー法は欠陥密度を検出するのに有効な電気的評価法である。この測定法の問題点としては、活性化エネルギー約 0.5 eV 以下の浅い欠陥準位しか検出できないことや、欠陥の極性が単独の測定では判定できないことが挙げられる。

3 光容量過渡分光法

3.1 測定方法

光容量過渡分光法 (Transient Photo-Capacitance Spectroscopy) は、入射する単色光の波長を掃引しながら光照射時と非照射時の電気容量変化を測定し、欠陥準位からの微弱な光応答信号を検出する手法である。本手法は、アドミタンススペクトロスコピー法では捕らえることのできないバンドギャップ中央に存在する深い欠陥準位を検出するのに有効である。光容量過渡分光法の測定のタイミングチャートを図 7 に示す。光容量過渡分光法では、接合にパルス電圧を印加後、電気容量 $C(t)$ を任意の時間 t_1 、 t_2 間で積分し、光照射の有無によるこの差分を光容量信号

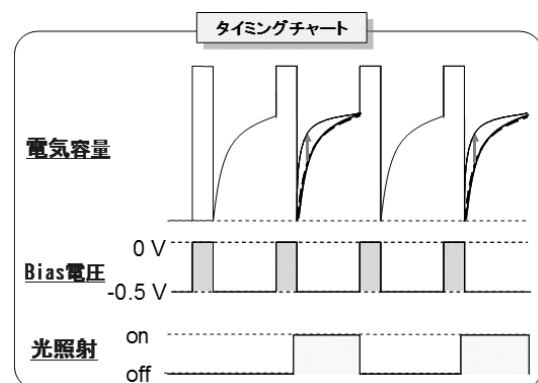


図 7 . 光過渡容量分光法の測定タイミングチャート

$$S_{TPC}(E_{opt}) \equiv \frac{\int_{t_1}^{t_2} C_{light}(t)dt - \int_{t_1}^{t_2} C_{dark}(t)dt}{PhotonFlux(E_{opt})} \quad (4)$$

として検出する¹⁸⁾。ここで E_{opt} は光子のエネルギーである。パルス電圧の印加により、光照射により変化した電荷分布を元の状態に戻すことが可能になり、高感度な信号検出が実現する。特に、CIGS 太陽電池では、光照射に伴う欠陥準位への電荷蓄積の影響が長時間残留するため（メタスタビリティ）^{1,4)}、本手法が有効である。

3.2 CIGS 太陽電池における深い欠陥準位の検出¹⁹⁾

光容量過渡分光法を用いた欠陥準位の検出例として、CIGS 太陽電池における深い欠陥準位の検出とその温度特性に関する実験結果を紹介する。図 8 に Ga 含有量の異なる CIGS 太陽電池（Ga/III 族比 0.38~0.7）の光容量スペクトルを示す。これより、全ての試料のスペクトルから、バンド間遷移に対応する光応答信号（ $E_{opt} \geq E_g$ ）と欠陥準位からの光応答信号（ $E_{opt} < E_g$ ）を確認することができる。まず、バンド間遷移に関しては、欠陥準位の応答に比べ二桁以上信号強度が高く、また試料の Ga/III 族比が増すのに従い高エネルギー側へシフトする様子がわかる。これは、Ga/III 族比の増加に伴いバンドギャップが増大することに対応する。一方、欠陥準位の光応答に関しては、試料の Ga/III 族比にかかわらず約 0.8 eV 付近に観測された。Wei らの理論計算では、欠陥準位のエネルギー位置は、Ga/III 族比に依らず、価電子帯端を基準としてほとんど変化しないことが示されている²⁰⁾。従って、0.8 eV 近傍の光応答信号は、価電子帯端から欠陥準位への光学遷移に対応するものと推測される。

図 9 に光容量スペクトルの温度依存性を示す。これより、試料温度が 200 K より高くなると、欠陥準位の光応答信号が徐々に減衰する様子がわかる。これは、欠陥準位に捕獲された電荷の熱失活過程に対応する。なお、温度上昇に伴いこの光応答信号が減衰する様子は、Ga/III 族比によらず全ての試料で観測された。続いて、アレニウスプロットを用いて熱失活に要する活性化エネルギーを求めると、Ga/III 族比

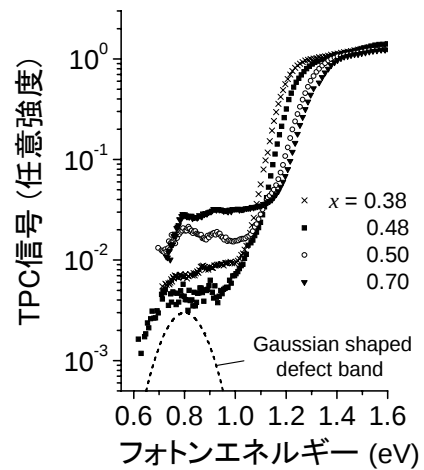


図 8 . Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ 太陽電池（0.38 ≤ x ≤ 0.7）の光容量スペクトル

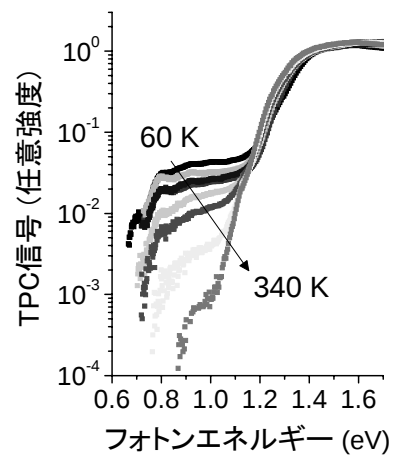


図 9 . CIGS 太陽電池(x=0.7)の光容量スペクトルの温度依存性

によらず約 0.2~0.3 eV と見積もられた。以上の光容量信号の温度変化を説明するため、我々は欠陥準位の光学応答を示す配位座標モデルを導入した（図 10）。

この配位座標モデルでは、基底状態（ E_0 ）と捕獲状態（ E_1 ）の相対エネルギー位置は Ga/III 族比によらず一定であり、一方、バンド間遷移に対応する励起状態（ E_2 ）の相対エネルギー位置が Ga/III 族比に伴い変化する。また、欠陥準位は捕獲電荷の有無により安定構造が異なるため、 E_0 と E_1 の底が異なる配位座標（ Q_0 、 Q_1 ）を示す。価電子帯から欠陥準位への光学遷移は図中 A→B に対応し、続いて欠陥準位の構造緩和（配位座標の変化）により B→C へと移動する。

なお、この C の位置では、電荷が捕獲されているため電気容量が変化し、光応答信号として検出することができる。一方、試料温度が高くなると、試料に C→D 間の障壁を越えるエネルギーが供給され、C→D→A の過程を経て基底状態に戻る。この時、欠陥準位に励起された電荷は即座に熱失活し価電子帯に戻るため、光応答信号が検出されない。配位座標モデルを導入した場合、光学遷移に要するエネルギー（約 0.8 eV）と熱失活に要するエネルギー（約 0.3 eV）が異なることや、これらのエネルギーに Ga/III 族比依存性がないことを、矛盾なく説明することができる。なお、深い欠陥準位と太陽電池特性（キャリア再結合）との相関は、今後さらに調べる必要がある。

4 まとめ

CIGS 太陽電池における欠陥準位の研究は、CIGS 薄膜特有の熱やバイアス電圧の印加に対する不安定性を取り除くことの可能な電氣的評価法の導入により進展した。特にアドミッタンススペクトロスコピー法や光容量過渡分光法による欠陥準位評価は、データの信頼性が比較的高く、世界各地の研究機関で広く普及してきている。ただし、CIGS 太陽電池の欠陥準位に関する研究は未だ発展途上であり、その測定結果だけを頼りに結論を出すと誤りを導くこともある。欠陥準位を正しく理解するためには、製膜プロセスや他の構造・光学評価法（蛍光寿命測定など）と組み合わせ、整合性のある結論を慎重に見出すことが不可欠である。

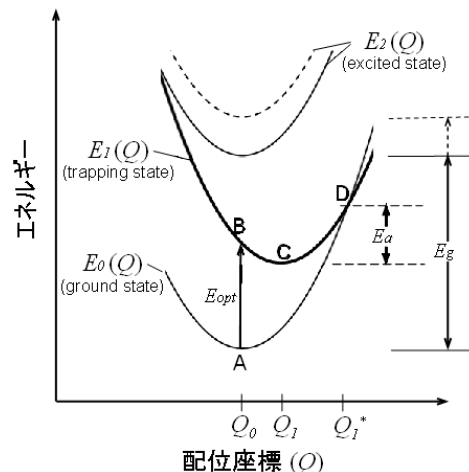


図 10 . CIGS 薄膜における深い欠陥準位の配位座標モデル（ E_{opt} ：フォトンエネルギー、 E_a ：熱失活過程の活性化エネルギー、 E_g ：バンドギャップ）

謝辞

本研究の一部は NEDO からの委託により実施したもので、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) M. Igalson and C. Platzer-Bjorkman, *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells* **84**, 93 (2004).
- 2) D.V. Lang, *J. Appl. Phys.* **45**, 3023 (1974).
- 3) W. Hönle, G. Kühn and U.C. Boehnke, *Cryst. Res. Technol.* **23**, 1347 (1988).
- 4) U. Rau, K. Weinert, Q. Nguyen, M. Mamor, G. Hanna, A. Jasenek and H. W. Schock, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **668**, H9.1 (2001).
- 5) W. Schockley and W.T. Read, Jr., *Phys. Rev.* **52**, 835 (1952).
- 6) E.H. Nicollian and J.R. Brews, *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, (John Wiley & Sons, New York, 1982), Appendix I.
- 7) T. Walter, R. Herberholz, C. Müller and H. W. Schock, *J. Appl. Phys.* **80**, 4411 (1996).
- 8) T. Sakurai, M.M. Islam, H. Uehigashi, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki and K. Akimoto, *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, in press.
- 9) S. Chaisitsak, A. Yamada and M. Konagai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 507 (2002).
- 10) S. Nishiwaki, N. Kohara, T. Negami, H. Miyake and T. Wada, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 2888 (1999).
- 11) M.M. Islam, T. Sakurai, S. Ishizuka, A. Yamada, H. Shibata, K. Sakurai, K. Matsubara, S. Niki and K. Akimoto, *J. Cryst. Growth* **311**, 2212 (2009).
- 12) T. Sakurai, N. Ishida, S. Ishizuka, M.D. Islam, A. Kasai, K. Matsubara, K. Sakurai, A. Yamada, K. Akimoto and S. Niki, *Thin Solid Films* **516**, 7036 (2008).
- 13) M. Wasim, *Solar Cells* **16**, 289 (1986).
- 14) T. Nakada, T. Mouri, Y. Okano and A. Kunioka, *Proc. 14th European Photovoltaic Solar Energy Conf.* (1997, Barcelona) 2143.
- 15) M.M. Islam, T. Sakurai, S. Otagiri, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Sakurai, K. Matsubara, S. Niki and K. Akimoto *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, in press.
- 16) S. Lany and A. Zunger, *J. Appl. Phys.* **100**, 113725 (2006).
- 17) S. Niki, R. Suzuki, S. Ishibashi, T. Ohdaira, P. J. Fons, A. Yamada, H. Oyanagi, T. Wada, R. Kimura and T. Nakada, *Thin Solid Films* **387**, 129 (2001).
- 18) J.D. Cohen, J.T. Heath, W.N. Shafarman, Photocapacitance Spectroscopy in Copper Indium Diselenide Alloys, in S. Siebentritt, U. Rau (Eds.), “Wide-Gap Chalcopyrites”, Chap. 5, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- 19) T. Sakurai, H. Uehigashi, M.M. Islam, T. Miyazaki, S. Ishizuka, K. Sakurai, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki, K. Akimoto, *Thin Solid Films* **517**, 2403 (2009).
- 20) S.H. Wei, S.B. Zhang and A. Zunger, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3199 (1998).

大阪大学大学院工学研究科 渡部研究室

渡部平司

大阪大学大学院工学研究科 生命先端工学専攻

大阪大学大学院工学研究科 附属超精密科学研究センター

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2 - 1

<http://www-asf.mls.eng.osaka-u.ac.jp/>

当研究室は、工学研究科生命先端工学専攻に属し、学部教育では応用自然科学科精密科学コースからの学部学生と一緒に研究を行っている。我々が所属する物質生命工学コースでは、外部からの優秀な学生の受入れに積極的であり、推薦入試や一般入試で毎年多くの外部生が入学している。平成 23 年 3 月現在の当研究室スタッフは、渡部に加えて、志村考功准教授と細井卓治助教の 3 名、2 名の特任助教、産総研からの招聘研究員 1 名、そして 2 名の事務補佐員で構成されている。渡部は平成 16 年に民間企業から大阪大学に赴任し、平成 18 年 11 月から現在の応用表面科学領域を担当している。以来、研究室発の独自研究に加えて、民間企業や外部機関との連携研究を積極的に推進し、社会人博士も毎年在籍しており、学生達のよき先輩そしてよい刺激となっている。平成 22 年度では、2 名の社会人博士を含む、計 5 名の博士後期課程学生、10 名の前期課程学生と 2 名の大学院留学生、5 名の学部 4 回生が在籍している。また基幹コースでは、成績優秀な学部 3 回生 1 名を各研究室に配属するトップ 8 制度が学部学生にとっても励みとなっている（写真 1 参照）。

研究領域としては、半導体 MOS デバイスを中心として、次世代グリーンエレクトロニクスに関する研究を推進している。渡部は、民間企業の基礎研究所でのナノテクノロジー研究、ナショナルプロジェクト（JRCAT）での原子層レベルの超薄絶縁膜形成と物性評価に関する研究活動を経て、生産部門に近い開発研究組織にて、超低消費電力 Si-LSI 用の High-k ゲート絶縁膜の研究を担当した経歴を有しており、材料科学や表面科学領域を渡り歩いた末に、次世代 MOS デバイスの研究に至っている。一方、志村准教授は、放射光を利用した次世代半導体基板や絶縁膜の構造評価、さら

には液相成長技術を応用したハイブリッド基板の新規作製技術の研究を行っている。細井助教は、Si-MOS デバイスの絶縁膜信頼性モデルの構築に加え、High-k デバイスの信頼性評価や、近年では高移動度 Ge-MOSFET ならびに SiC パワー MOSFET 研究への展開を図っている。



写真 1 . 研究室メンバー集合写真（平成 22 年度）

この様に“何でも材料・表面屋”の渡部と、放射光をベースとした材料解析を専門とする志村准教授、デバイス専門の細井助教の 3 教官の絶妙なバランスの上に研究室が成り立っている。学生達への研究指導では、テーマ毎に主担当の教官を決めているが、原則として 3 名の教官全員と学生達との打ち合わせを毎週開催している。具体的には、研究室を五つのグループに分け、曜日を決めて夕方から生の実験データを睨みながらの研究打ち合わせを行う。この打ち合わせでは必ず教官が学生達の部屋に出向き、彼らの“ホーム”で打ち合わせをすることに決めている。「私の部屋に来たまえ！」の雰囲気は可能な限り無くしたいと思っている。教官 3 名にとっては、出張や外出以外は、夕方から長時間にわたって打ち合わせが続くこと

も多々あり、大変な負荷となるが、今後も続けたい。学生達にとっても専門性が異なる3名の教官を一度に相手にすることになり、良い訓練になっている(と思いたい)。また打ち合わせに当たらない他の学生達は、実験の進め方や結果の解釈に文句をつける教官達の声に聞き耳を立てながら、自分達も同じ“地雷”を踏まないための思考回路と実験スキルを身につけて欲しいと考えている。

我々にとって基幹となる精密科学・応用物理学専攻精密科学コースでは、これまで文部科学省COEと21世紀COEプログラムに採択され、現在は後継プログラムであるグローバルCOE(平成20年度採択)を継続して推進している。この間、平成13年には、学内外との連携研究推進を目的として“物づくり研究”を特徴とした超精密科学研究センターが工学研究科附属の組織として発足した。現在、渡部がセンター長を兼任すると共に、細井助教も兼任教員として、その運営に参加している。写真2は同センターの連携研究拠点の要となる21世紀プラザの外観と、一階および地階部分に設置されたクラス1クリーンルーム(約900m²)内の様子である。

これらのプロジェクトや組織は、基幹8研究室(7研究室・1センター)による共同運営を基本としている。共通利用の各種分析・評価装置やプロセス装置に加え、各研究室が独自研究を実施するための特殊装置が設置されている。クリーンルーム内では、超純水や超高純度ガス、さらにはシラン等の特殊材料ガスの利用が可能であり、民間企業との共同研究や、大型予算での応用研究を実施している。一方、じっくりと時間をかけた基礎研究に取り組む場として、平成9年度稼動のもう一つのクラス1クリーンルーム(415m²)についても当センターが中心となった共同運用体制を構築している。

これらの共通施設の運用は、若手教員と学生達の努力で成り立っており、毎年、研究室に配属された学生は、工学系の通常の安全教育に加えて、クリーンルーム施設に関する安全講習を受講し、ライセンスを取得してからでないと、施設内での単独実験を行うことが許されない。若手教員やセンター所属の技術補佐員、そしてGCOEでの教育環境整備を目的とした派遣職員が中心となって平素の施設管理やメンテナンスを行っている。学生

達は、日常の施設点検に加えて、若手教員の指導のもと、博士後期課程学生から学部学生の全員が、何らかの役割を担っている。このような研究教育環境は、旧来の研究室間の垣根を取り除いたモデルケースであり、高価な機器の共通利用により効率的な研究体制を構築できている。



写真2．超精密科学研究センターの外観ならびにクラス1クリーンルーム内の様子

とは言え、2棟のクラス1クリーンルームに限られたマンパワーで安全に運用することは、多くの教員の献身的な努力によって支えられている。勿論、施設長である筆者をはじめ、各研究室を主宰する教授陣は、組織の継続運営と外部資金獲得のために日々奔走している。学生達にとっても多くの付加的な“お勤め”が発生するわけであるが、恵まれた環境での最先端研究と、施設管理や安全意識の向上、そして民間企業との共同研究を通じた目的基礎研究に参加できるメリットは計り知れない。先日、某大手企業に就職した卒業生が、後輩に向けた言葉を聞く機会があり、その中で「企業に入ると、大学の様な恵まれた環境での実験が出来なくなるので…」と語った時には時代の流れを感じた。以前の、研究室のガラクタを寄せ集めて実験装置を手作りしていた時代とは、大学での研究も様変わりしてしまったと、筆者自身、反省

材料としている。恵まれた実験環境を手に入れることも大切であるが、少ない予算のなかで、知恵を絞る訓練はもっと大切であろう。事実、サンプルを全自動の測定装置にセットして、画面上でクリックを繰り返すとゲーム感覚でお洒落なデータが出てくると錯覚している学生が見受けられるのも事実である。いずれにしても大学での活動は、良い研究を学生達と一緒に取り組むことに集約されるので、教育方針に関しては今後も試行錯誤を繰り返しながら、取り組みたいと考えている。体力の続く限り・・・。

さて、最後となったが、当研究室では次世代の超低消費電力 LSI や SiC パワーデバイス開発において、最も重要な技術課題とされる高品質 MOS 構造の作製とその評価に関する研究に取り組んでいる。金属電極と High-k 絶縁膜との複合技術は、LSI の低消費電力化に欠かせない。近年、米国の Intel 社から Metal/High-k スタックを搭載したデバイスが実用化されているが、製造コストや微細化に対して課題を有しており、Metal/High-k スタック導入の効果を十分に引き出しているとは言い難い。当研究室では民間企業との連携研究を通じて、真空一貫界面固相反応を応用した、高品質かつ汎用性に優れた High-k ゲートスタックの作製技術を提案し、その研究開発を継続している[1,2]。また、他大学やコンソーシアムとの連携研究を通じて、Metal/High-k スタック界面に生じる界面ダイポールの形成メカニズムの解明や[3]、その制御技術に関する新技術提案に取り組んでいる[4]。

さらに LSI の高性能化に向けて、シリコン半導体よりもキャリア移動度が高いゲルマニウム半導体をチャネル材料として用いた Ge-MOS デバイスの作製技術に関する研究を推進している。近年、Ge-MOS の界面電気特性向上に関する研究成果が世界中の研究機関から報告されている。当研究室では、GeO₂/Ge 界面の基礎物性の理解[5]に加えて、ゲルマニウムチャネルが導入される世代を想定し、絶縁層膜厚が極めて薄い領域での、界面電気特性向上とゲートリーク電流低減を可能にする新規 Ge-MOS 構造の研究開発に取り組んでいる。これまで、高密度プラズマ窒化技術を応用した極薄 GeON 絶縁膜や[6]、Ge-MOS 構造への酸素透過を抑制可能なアルミナ系ゲート絶縁膜の応用を検討している。

一方、パワーデバイスの研究開発では、優れた物性値を有したシリコンカーバイドを用いた高耐圧・低オン抵抗 SiC-MOSFET への期待が高まっている。この領域においても、高品質な SiC-MOS 構造を実現することが重要課題となっている。当研究室では、放射光光電子分光や各種物理解析手法を駆使して SiO₂/SiC 界面物性を明らかにすると共に[7]、アルミナ系 High-k 絶縁膜の SiC パワーデバイスへの応用を試みている[8]。

上記の研究テーマの他にも、放射光 X 線を用いた次世代 LSI 用基板の評価[9]、局所空間での液相成長を利用した局所 GOI 構造作製技術[10]、さらにはバイオテクノロジーを応用したナノ粒子の選択配置技術やそのデバイス応用に関する研究にも取り組んでいる[11]。

以上、思い付くままに研究室に関する諸々を書いたが、結局のところ“いつまでも研究を続けたい自分(著者)”が“学生達を引きずり回す(引きずり回される?)”ことが彼らの教育となるのであれば、これ程大義名分が立つものはない。ただ、昨今の教育システムの変革の中で、学生達に引きずり回してもらう時間を如何にひねり出すが、著者の最近の悩みである。

【参考文献】

- [1] H. Watanabe *et al*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 1910 (2007).
- [2] N. Kitano *et al*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L1111 (2007).
- [3] Y. Kita *et al*, Appl. Phys. Lett. **94**, 122905 (2009).
- [4] T. Hosoi *et al*, Tech. Digest VLSI Tech. p. 179 (2010).
- [5] T. Hosoi *et al*, Appl. Phys. Lett. **94**, 202112 (2009).
- [6] K. Kutsuki *et al*, Appl. Phys. Lett. **95**, 022102 (2009).
- [7] H. Watanabe *et al*, Mater. Sci. Forum (in press).
- [8] T. Hosoi *et al*, Mater. Sci. Forum, **645-648**, 991 (2010).
- [9] T. Shimura *et al*, J. Materials Science: Materials in Electronics, **19**, S189 (2008).
- [10] T. Hashimoto *et al*, Appl. Phys. Express, **2**, 066502 (2009).
- [11] B. Zheng *et al*, Chemical Physics Letters (in press).

科学英語一言メモ (11) : 終わっているけれど終わっていない現在完了

-English Tips from Behind the Scenes-

山下 理恵

筑波大学 数理物質科学研究科

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

学生から上級者まで戸惑いの声を聞くのは時制である。過去形で淡々と述べる実験手順や結果と異なり Abstract や Introduction で「研究した」というには

a) We studied the properties of graphene.

b) We have studied the properties of graphene.

過去形, 現在完了形のどちらを使うとよいのだろうか。論文を書いている「今」から遡る過去の業績として過去形にすべきか, それとも, 完了したばかりのほやほや感を出すために現在完了形にすべきなのだろうか?

混乱の原因は現在完了形にある。実は現在完了は過去(過去から現在直前まで)に起きたことを述べながらも過去形という時制の一種ではなく, 起きた結果の「現在の状態」について述べるむしろ「現在形」ともいえる。具体的な過去の年代や, 時間を表す副詞語句と一緒に使えない現在完了は起きた「過去の時点」より, 行為・出来事の「現在との関連性」に焦点があるのである。つまり

c) I can't go skiing because I broke/ have broken my leg.

スキーに行けない理由は「過去に骨折したこと(今は完治)」より「骨折してスキーができない現在の脚の状態」になるので, 過去形ではなく現在完了形となる。また

d) To maintain quality, BHT was/ has been added to the food.

食品の品質を保つための酸化防止剤(BHT)が, 過去形だと単に過去に添加されたただだが, 現在完了形なら, 添加された結果, 今も有効で酸化防止効果を発揮している。

冒頭の「研究する」という一定期間にわたる動作に,

e) We studied the properties of graphene for five years.

f) We have studied the properties of graphene for five years.

5年間という期間をつけると, e) の過去は, 過去のある時点で5年間研究が行われ, それは現在終了しています, という過去のお話しであるのに対し, f) の現在完了は, 5年前から今までずっと行ってきたところです, という状況を指し, 研究がそこで完結しているとも, 現在まだ継続中であるとも, 両方の意味に解釈が可能である。つまり, 現在完了はあくまで行為の結果の状況を伝えているだけで, この場合, 動作自体が完了しているとは限らないのである。冒頭の例文 a) の過去形だと, グラフェン研究はもちろん過去にきっちり完結しているということになるし, b) の現在完了形なら, 今までの5年間という限定がないので直前までの動作とは特定できないが, これまでという

一応の区切りのついた研究結果がどうなのか, ということが焦点なので, “and we found...”と結果や問題点が続き, さらなる study が検討されるなど, 経過報告的なニュアンスとなる。但し, study/ investigate のような継続した動作を表す動詞と異なり, develop や determine など実現/達成の瞬間が明確に示される動詞の場合, 現在完了で動作は完了し, 完成の瞬間直近の達成感で, 最新結果が強調されるが

g) Researchers have developed a smartphone application that can provide special educational and social support to children.

例文の携帯電話のアプリのように新製品の開発が繰り返されていることも予想され, あくまで現在進行中の行為の「これまでの結果」に過ぎず, 現在完了は最終結果とはならない。(「固定電話」というもう変化しない最終的な製品なら Bell invented the telephone. と過去形になる)

h) These tunneling effects have been reported/ determined in previous studies. (○○2005, △△2008, ××2009)

と, 過去の出版年数の付記された先行研究紹介で現在完了形が使われるのは, 過去に報告/確認があった事より「過去の報告事例を現在話題にする価値があることにご注目ください」と話題を導入, 現状への影響力/有効性に聞き手の注意を喚起するため, 続く先行研究の中身の説明は, 既に終わった出来事として過去形となる。報道文も同様で, はやぶさ帰還のニュースは

i) A capsule thought to contain the first samples grabbed from the surface of an asteroid has returned to Earth.

まず, カプセルが地球に帰還したという過去の出来事を注目すべき状況として現在完了形で伝え, The Japanese Hayabusa container hit the top of the atmosphere just after 1350 GMT, producing a bright fireball over southern Australia. と, はやぶさの大気圏突入が過去形で続く。

Methods や Results などの実験手順や結果が過去形なのは, もう繰り返されることのない, 既に終わった過去の定まった動作・出来事で, 現在との関連性を訴える必要がないからである。完結した最終結果にはシンプルに過去形を, これまでの結果を Introduction や Conclusion で直近感を強調して伝えるには現在完了形を使うのが適当だろう。



山下 理恵 (やました りえ)

お茶の水女子大学文教育学部卒。主に, 物質材料科学・工学系の英文校閲・翻訳に従事。訳書「いかんにして実験をおこなうか」(丸善)

「第 39 回 薄膜・表面物理基礎講座」開催報告

旭硝子 中央研究所 小高 秀文
早稲田大学 大学院理工学研究科 渡邊 孝信

本分科会主催の第 39 回薄膜・表面物理基礎講座「いまさら訊けない 太陽電池のための薄膜形成・分析技術」が、2010 年 11 月 25 日（木）・26 日（金）の両日に渡り早稲田大学西早稲田キャンパスにて開催された。地球温暖化対策の一環として、太陽電池技術の開発および普及に対し積極的な補助策が各国で設けられ、太陽電池技術の開発競争が、以前にも増して激しく繰り広げられるようになった。今回の基礎講座では、シリコン系、化合物系、有機系、量子ドット型など第三世代まで、幅広い材料の太陽電池技術を取り上げ、それぞれの専門の講師の方々に、薄膜形成と分析技術について、基礎から丁寧に解説して頂いた。本稿では、それらの講演の要点をまとめて報告する。

基礎講座初日は、シリコン系から、化合物系、有機系、第三世代まで、幅広い太陽電池技術に関する 5 件の講演が行われた。

産総研の近藤道雄氏には「太陽電池技術の最新動向」と題して、太陽電池の基本原理解から説き起こして頂き、様々な太陽電池技術と産業構造に至るまで、幅広くご講演頂いた。まず太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する効率の限界について解説頂き、1%の効率アップが 10%のコスト削減に匹敵するインパクトを持つことが説明された。この変換効率と発電コストという観点から、結晶シリコン、薄膜シリコン、CdTe や CIGS などの化合物、有機薄膜、色素増感型、集光型など、様々な太陽電池技術を俯瞰して頂いた。太陽電池が他のエレクトロニクスデバイスと決定的に違う点は「まずコストありき」という点にあり、低コストの太陽電池を大量に供給できる決定打となる技術の登場が待望されていることを指摘頂いた。

東京工業大学の黒田康良先生には「第三世代太陽電池研究開発の現状—シリコン量子ドット・ワイヤを用いた新世代太陽電池—」と題して、従来の太陽電池の基本原理解を超える新概念の導入によって効率 40%以上の高効率太陽電池を目指す、第三世代太陽電池の研究動向について解説頂いた。まず、30%という変換効率の限界を示した Shockley-Queisser Limit について詳しく説明され、この限界を打ち破る方法として、タンデ

ム型や中間バンド型、熱緩和損失を抑制するホットキャリアセル、マルチエキシトン効果を利用する方法などが示された。更にシリコン量子ドットやシリコンナノワイヤを用いた第三世代太陽電池技術を紹介頂いた。

大阪大学産業技術研究所の小林光先生には、「表面・界面制御によるシリコン太陽電池の高効率化」と題してご講演頂いた。半導体中の欠陥準位や表面の金属汚染で太陽電池のエネルギー変換効率が著しく劣化するが、本講演ではこれらを一挙に解決する欠陥消滅型半導体洗浄法が紹介された。従来の一般的な RCA 洗浄法と比べ、半導体表面をエッチングしないこと、室温での洗浄を可能にすることなど、多くの利点を備えている。また、強い酸化作用を持つ硝酸を用いる低温酸化法も紹介され、界面ストレスが小さく良好な電気特性を有する SiO_2/Si 界面が形成できることが示された。

北海道大学の島田敏宏先生には「有機太陽電池における有機・無機界面評価技術」と題してご講演頂いた。有機半導体では光吸収波長とエネルギー準位を自在に制御でき、元素戦略上も有利であるため、有機半導体の研究開発が近年活発化しているが、無機半導体に比べて、励起子を熱的に正負キャリアに解離することが困難であり、「バルクヘテロ構造」と呼ばれる異種分子が入り組んだナノ構造の形成など、電荷分離のための工夫が必要となる事が説明された。また、有機分子の電子状態の各種測定法について解説して頂き、表面科学的な分析手法のさらなる発達が必要であることが示された。

立命館大学の峯元高志先生には「太陽電池のデバイスシミュレーション—CIGS 太陽電池の最適設計—」と題してご講演頂いた。太陽電池の主要部は単純なダイオード構造であり、通常の半導体デバイスシミュレーションで再現できること、シミュレーションの結果と実デバイスの比較から、使用している材料の物性値の推定や、効率向上のボトルネックの抽出が可能であることが説明された。各研究機関からリリースされているソフトの入手方法、使用方法など、実演を交えて解説して頂いた。シミュレーションを用いる際は、計算の前提を知りシミュレーションの限界を把握すること、

各種太陽電池に適したシミュレータを使用する事、シミュレーション単独での議論を避けることが重要である事など、留意点が述べられた。

基礎講座2日目は、化合物系太陽電池技術を中心に5件の講演を行った。

筑波大学の櫻井岳暁先生には、「CIGS 太陽電池における欠陥準位評価法（電気・化学測定）の紹介」と題してご講演頂いた。CIGS 薄膜に存在する欠陥準位は、熱やバイアス電圧のストレスに対し不安定であるため、通常の半導体の欠陥準位検出法の使用が難しい。本講演では、CIGS 薄膜の評価に適したアドミッタンススペクトロピー法と光容量過渡分光法を取り上げ、測定原理および評価例について詳しく解説頂いた。アドミッタンススペクトロピー法は浅い欠陥準位の検出に有効であるが、バンドギャップ中央に存在する深い欠陥準位の検出には、光容量過渡分光法が適していることが説明された。

産総研の仁木栄氏には、「CIGS 太陽電池の研究開発の歩みとさらなる高性能化」と題してご講演頂いた。CIGS は光吸収係数が高い省資源型の太陽電池材料であり、研究室レベルで 20%を超える高い変換効率が実現されていることから、非シリコン系の薄膜太陽電池として実用化への期待が高まっていることが強調された。CIGS 光吸収相の製膜法、Cu 過剰条件や Na の導入など高効率化を可能にした諸技術について解説され、さらに集積型モジュールの高効率化、フレキシブル CIGS 太陽電池の実現に向けた課題が紹介された。

東京理科大学の荒川裕則先生には、「色素増感太陽電池のための薄膜形成・分析技術」と題してご講演頂いた。まず Ru 色素を用いる Graetzel セルについての解説があり、pn 接合を利用する他の太陽電池とは異なり、むしろクロロフィル色素の光電子変換機構に似た光合成模倣型の太陽電池であることが強調された。次に色素増感太陽電池開発に用いられる分析技術が紹介され、電気化学的抵抗 (EIS) 測定を用いた発電損失の解析例を紹介して頂いた。

木更津高専の岡本保先生には、「CdTe 多結晶太陽電池」と題してご講演頂いた。直接遷移型である CdTe は光吸収係数が高く薄膜化が可能であること、イオン性が強く多結晶構造でも比較的高品質の結晶が得られることから、低コストで高効率な太陽電池材料として欧米では急速に生産量を伸ばしている。本講演では、CdTe 太陽電池の基本的構造と、高い変換効率が得られている近接昇華法による製膜プロセスについて詳しく解説された。日本では Cd の有害性から製造・販売され

ていないが、Zn などの金属精錬の副産物として発生する Cd を安全に有効利用するという観点では、CdTe 太陽電池はむしろ環境保護に貢献できる製品であることが指摘された。

九州大学の本岡輝昭先生には、「ガラス基板上薄膜 Si 結晶成長過程の分子動力学シミュレーション」と題してご講演頂いた。分子動力学 (MD) 計算の原理と温度制御アルゴリズムについて解説頂いた後、Si の固相成長、融液成長、核形成過程などの原子スケールシミュレーション結果を、CG アニメーションを駆使して判り易く紹介頂いた。MD シミュレーションの対象は時間的、空間的に極めて微小な領域に限られるが、固相成長の活性化エネルギーや a-Si 層のレーザアニール結晶化における結晶粒サイズについて実験と比較し得る結果が得られる等、有効な原子スケール解析手法であることが示された。

太陽電池を取り上げた同様のセミナー企画が他学協会でも同時期に開催されたこともあってか、今年の基礎講座の受講者数は昨年同様 34 名（内学生 15 名）にとどまった。しかし質疑応答が活発に行われ、活気のある基礎講座であったと思う。依然厳しい経済情勢を鑑み、今回は1日のみの参加も可とするなど、企業からの参加を促す工夫を試みたが、今回はむしろ大学からの参加者が過半数を占めた。クリーンテクノロジー分野への重点化を受け、太陽電池技術における新しい課題に関心を寄せる大学関係者が増えていることの顕れと思われる。講師の先生方には「いまだに訊けない...」と銘打った今回の企画の趣意を十分理解頂き、お忙しい中、様々な太陽電池技術を基礎からわかりやすく丁寧に解説して頂いた。参加して下さった皆様にとって有意義な講座となったのではないかと思います。この場を借りて深く感謝の意を表します。



基礎講座の会場風景

「ゲートスタック研究会－材料・プロセス・評価の物理－」(第16回)開催報告

実行委員長 鳥居和功

応用物理学会薄膜・表面物理分科会とシリコンテクノロジー分科会共催の特別研究会「ゲートスタック研究会－材料・プロセス・評価の物理－」(第16回研究会)が、1月21～23日の3日間にわたり、東京工業大学西9号館多目的ホールで行なわれた。開催にあたり、日本物理学会、日本化学会、日本金属学会、日本表面科学会、電子情報通信学会、電気学会、触媒学会、日本真空協会、電気化学会、表面技術協会、日本顕微鏡学会、日本セラミックス協会、精密工学会の協賛を頂いた。

代表的な半導体デバイスであるMOSFETにおいて、そのゲートスタックの高性能化は最も重要な研究課題の一つである。原子層レベルで膜厚や構造を制御したゲート絶縁膜、歪シリコン基板やプロセス歪、化合物材料を利用した高移動度チャネル、メタルゲート電極の研究開発が精力的に進められている。ナノスケールの固体物理、プロセス制御技術、信頼性物理がデバイス性能に直結することから学術的にも興味深い分野である。この研究会は、2004年まで9回にわたって開催された「極薄シリコン酸化膜の形成・評価・信頼性」研究会のスコップを広げて、2005年から新たにスタートしたものであり、第一線の研究者が基礎から応用までを理論・実験の両面から議論し、本分野の発展に貢献することを目的としている。

今回の参加登録者数は123名、講演件数は43件(基調講演2件、招待講演8件、一般講演33件)であった。今回は、直前の1/20～21日に開催された国際会議IWDTF2011(International Work-shop on Dielectric Thin Films)と、21日午後を合同開催とした点に特徴がある。初日は、G. Bersuker(SEMATEC)による合同基調講演講演「Changing paradigm for advanced gate stack evaluation: Reliability modeling at atomic structure level」で幕を開け、最近、信頼性に分野で注目が集まっているLow Frequency noiseに関する4件の講演と、新メモリとして開発が進むReRAMに関する4件の講演が行われた。最後に松波弘之先生(JST 京都)が「Technological challenges in SiC MOS devices」と題する基調講演で、地球環境保護に向けた省エネルギーデバイスとして注目されるSiCデバイスの立場から、その技術課題とこの研究ソサイエティへの期待を熱く語られた。

二日目は、由上二郎氏(ルネサスエレクトロニクス)による「ゲートファースト”メタルゲート/high-k CMOS プロセスの展望」、江利口 浩二先

生(京都大学)による「物理的プラズマダメージによるMOSFETオフリーク電流とそのバラツキの増大モデル」、竹内 健先生(東京大学)による「強誘電体FETを用いた低電力NANDフラッシュメモリ・SRAM技術」3件の招待講演と2件の一般講演に始まり、昼食をはさんで2時間のポスターセッションが行われた。今回はIWDTF2011直後ということもあり、ポスター講演者はほとんどが学生であったが、時間一杯にわたり、各ポスターを前に熱心な議論が続けられた。引き続き、本研究会の目玉の一つである「フォーカスセッション」行われた。今回は、三谷祐一郎氏(東芝)が「ゲート絶縁膜の信頼性」について最新の実験結果や理論を紹介し、白熱した議論が1時間にわたって行われた。このあと、西村知紀先生(東京大学)による招待講演「high-k/Ge MOSFETにおける移動度特性の向上」と3件の一般講演で2日目を締めくくった。

最終日は、細井卓治先生(大阪大学)による「High-k/Metal ゲートスタックにおける酸素空孔形成要因と実効仕事関数変調機構」小野倫也先生(大阪大学)による「第一原理計算によるSi及びGe MOS 界面原子構造とリーク電流特性の予測」、染谷隆夫先生(東京大学)による「フレキシブルトランジスタとメモリのための極薄ゲート絶縁膜技術」の3件の招待講演と7件の一般講演が行われた。

全講演終了後、若手研究者の奨励賞である服部賞・安田賞の表彰が行なわれた。今回、安田賞は千葉大/町田義明氏の「不純物ドーピングした金属シリサイドの電子構造に関する理論的検討」と阪大/荻原伸平氏の「急速加熱液相エピタキシャル成長法による高Ge濃度SGOI構造の作製」が、服部賞は、奈良先端大/田畑裕貴氏の「高分解能角度分解光電子分光測定による高濃度n型Si(001)及びp型歪みSi(001)表面の電子状態」と奈良先端大/松岡弘憲氏の「高分解能角度分解光電子分光測定によるGe(110)表面の電子状態と有効質量の決定」が受賞した。今後とも本研究会が、若手のみならず、この分野の全研究・開発者の活性化に寄与できれば幸いである。

次回は、2012年1月に開催の予定である。

最後に、本研究会開催にあたり資金的援助をいただいた独立法人 物質・材料研究機構(NIMS)、および研究会開催にご協力いただいた多くの方々に感謝いたします。

「次世代電子デバイスのための誘電体薄膜：科学と技術」 2011 年国際ワークショップ開催報告

組織委員長	宮崎誠一
副組織委員長	高木信一
実行委員長	渡部平司
プログラム委員長	鳥居和功

去る平成 23 年 1 月 20 日(木)・21 日(金)の両日、標記国際会議(2011 International Workshop on DIELECTRIC THIN FILMS FOR FUTURE ELECTRON DEVICES: SCIENCE AND TECHNOLOGY (IWDTF-11))が東京工業大学大岡山キャンパスのデジタル多目的ホールにて、応用物理学会の主催により、薄膜・表面物理分科会ならびにシリコンテクノロジー分科会の協賛で開催された。本会議は、電子情報化社会の発展を支えるシリコン ULSI 技術において重要な技術課題とされる金属-酸化膜-半導体(MOS)ゲートスタックや、関連する誘電体薄膜に焦点を当てつつ、メタル電極や新チャネル材料との複合技術も含めた次世代ゲートスタックにテーマを広げ、国内外の大学・産業界の技術者及び研究者に対して、議論と情報交換の場を提供することを目的としている。薄膜・表面物理分科会とシリコンテクノロジー分科会の共催で毎年同時期に開催する「ゲートスタック研究会」での議論と経験を踏まえて 1999 年に第一回会議を開催し、2004 年に東京にて第二回、2006 年に川崎にて第三回、2008 年には同じく東京工業大学大岡山キャンパスにて第四回を開催し、今回、第五回の国際ワークショップとして IWDTF-11 を開催した。今回は新たな試みとして、ゲートスタック研究会(1 月 21 日～23 日)との連続開催とし、21 日午後に基調講演 2 件を含む合同セッションを設定・実施した。両会議の一部合同開催は、次世代電子デバイスの情報発信源としての本国際ワークショップの更なる発展と、大学や民間企業の若手研究者への教育的配慮ならびに国際的な舞台への発展の足がかりとなることを意図している。

今回の会議では、2 件の基調講演と 2 件の招待講演を含む計 33 件の口頭発表に加えて、45 件のポスター発表があった。昨今の厳しい経済状況にも関わらず、前回とほぼ同程度の 151 名の参加者が集まる盛大な会議となった。さらに海外からの発表が約 4 割に達すると共に、特にアジア諸国からの論文投稿と参加者が回を重ねる毎に増加する傾向にあり、当該分野に関するアジアの主要会議として認知されている。基調講演では、米国 SEMATECH の Bersuker 博士から最先端シリコン LSI 用 High-k ゲートスタックの信頼性を支配する原子レベルの欠陥に関する講演があった。また、JST 京都の松波先生からは、次世代パワーデバイスとして注目を集める SiC-MOS デバイスに関する研究開発の歴史に加え、研究者間の融合により、これまで多くの研究者がシリコンテクノロジー領域で蓄積してきた知見を、SiC パワーデバイス分野でも活かして欲しいとの激励があった。招待講演では、ベルギーIMEC の Ragnarsson 博士から Metal/High-k トランジスタのキャリア移動度劣化に関する講演が、また東京工業大学の安藤先生からは、次世代電子デバイスへの応用展開が期待されているグラフェンの電気伝導に関する詳細な報告があった。一般講演では、酸化膜換算膜厚 1nm 以下の領域を見据えた次世代 Metal/High-k スタック技術や、化合物半導体やゲルマニウム等の高移動度チャネルに関する研究発表が注目を集めた。また新規メモリー技術への関心も高まっている。さらに絶縁膜材料に関する理論研究や基礎物性に関する研究発表が多いことも本会議の特徴であり、様々な物理限界に直面している次世代電子デバイスの研究開発にブレークスルーをもたらす新しいアイデアが生まれることが期待される。

最後に本会議の開催にあたりご支援頂いた、富士通(株)、(株)日立製作所、パナソニック(株)、ルネサスエレクトロニクス(株)、(株)半導体先端テクノロジーズ、ソニー(株)、(株)東芝、東京エレクトロン(株)、また運営にご協力頂いた関係各位に感謝いたします。



第39回 薄膜・表面物理セミナー(2011) 次世代ナノテクのためのナノ計測・加工技術

次世代の工業製品開発には、ナノ計測、ナノ加工技術の進捗が不可欠であり、産業界では最優先課題となっています。計測加工手段としては、電子、イオン、探針などをプローブに用いた方法が研究開発されていますが、特に分解能の限界や計測加工が難しい材料を中心にご研究されている講師の方々に最先端技術をご紹介いただき、次世代ナノテクを含めた技術展望を学び議論したいと考えています。たくさんの方々のご参加をお待ちしております。

日時：2011年7月22日(金) 10:00-17:50

**場所：産業技術総合研究所 臨海副都心センター
別館11階 会議室1**

(東京都江東区青海2-3-26, 03-3599-8001, ゆりかもめ テレコムセンター駅, りんかい線 東京テレポート駅下車)

http://www.aist.go.jp/aist_j/guidemap/pdf/waterfront_map.pdf (アクセスマップ)

1. プログラム:

日 時	講 演 題 目	講 師
10:00 ~ 10:55	電子顕微鏡の最新計測技術 (仮題)	高柳 邦夫 (東京工業大学)
10:55 ~ 11:50	プローブ顕微鏡による液中原子・分子スケールイメージング および固液界面評価の最前線	山田 啓文 (京都大学)
昼休憩		
13:00 ~ 13:55	三次元中エネルギーイオン散乱装置を用いた軽・重元素の分析	小林 峰 (理化学研究所)
13:55 ~ 14:50	デバイス特性ばらつきと三次元アトムプローブ解析	最上 徹 (半導体先端テクノロジズ)
休憩		
15:05 ~ 16:00	電子線描画法および自己組織化法を用いた 3Tbit/in ² 超高密度記録ビット列形成	保坂 純男 (群馬大学)
16:00 ~ 16:55	集束イオンビームによる超微細加工とその応用	松井 真二 (兵庫県立大学)
16:55 ~ 17:50	原子間力顕微鏡を用いた室温元素識別・原子操作	森田 清三 (大阪大学)

現在非会員の方でも、参加登録時に薄膜・表面物理分科会(年会費A会員:3,000円, B会員:2,200円)にご入会いただければ、本セミナーより会員扱いとさせていただきます。

<http://www.jsap.or.jp/> より入会登録を行い、仮会員番号を取得後、本セミナーにお申込み下さい。

入会決定後、年会費請求書をお送りいたします。(年会費をセミナー参加費と同時に振込なさらないで下さい。)

***学生の場合は、会員・非会員の別を問いません。

3. 定員：65名(満員になり次第締め切ります。)

4. 参加申込締切：2011年7月1日(金)

5. 参加申込方法：下記分科会ホームページ内の登録フォームにて参加登録してください。

<http://annex.jsap.or.jp/tfspd/>

参加登録完了後、下記銀行口座に参加費をご連絡いただいた期日までにお振込ください。原則として参加費の払い戻し、請求書の発行は致しません。領収書は当日会場にてお渡しいたします。

6. 参加費振込期限：2011年7月8日(金)
参加費の入金確認後、参加証をお送りします。

7. 参加費振込先：

三井住友銀行 本店営業部(本店でも可)

普通預金 口座番号：9474715

(社) 応用物理学会薄膜・表面物理分科会

(シャ) オウヨクツリガッカイハクマク・ヒョウモンツリガッカイ

8. セミナー内容問合せ先：

筑波大学 山部 紀久夫

TEL: 029-853-6475 FAX: 029-853-5205

E-Mail: yamabe@esys.tsukuba.ac.jp

群馬大学 曾根 逸人

TEL: 0277-30-1551 FAX: 0277-30-1551

E-Mail: sone@el.gunma-u.ac.jp

9. 参加登録問合せ先：

応用物理学会事務局分科会担当 上村 さつき

TEL: 03-3238-1043 FAX: 03-3221-6245

E-Mail: divisions@jsap.or.jp

2. 参加費：テキスト代，消費税を含む。

薄膜・表面物理分科会会員*	応用物理学会会員**・協賛学協会会員	学生***	その他
10,000円	15,000円	3,000円	20,000円

*薄膜・表面物理分科会賛助会社の方は分科会会員扱いといたします。

**応用物理学会賛助会社の方は、応用物理学会会員扱いといたします。

2011年度
薄膜・表面物理分科会
幹事選挙結果報告

平成23年1月26日

標記選挙の結果, 下記の通り候補者が信任されました。なお, 有効投票数264, 白票1, 無効投票数1でした。

氏 名	所 属	信 任
飯島善時	日本電子(株)	264
市川昌和	東京大・院工	264
小川真一	産総研	263
河津璋	東京理科大・理工	263
河原敏男	中部大・超伝導	263
木村健二	京都大・院工	263
越川孝範	大阪電通大	264
小高秀文	旭硝子(株)	264
重川秀実	筑波大・物理工	264
重里有三	青山学院大・理工	264
鈴木真理子	(株)東芝	263
住友弘二	NTT(株)	264
曾根逸人	群馬大・院工	264
高桑雄二	東北大・多元物質研	264
田中悟	九州大・院	264

氏 名	所 属	信 任
田部道晴	静岡大・電子工研	264
内藤正路	九工大・工研院	264
中原仁	名古屋大・院工	264
中村雅一	千葉大・工・電気電子	264
長谷川修司	東京大・院理	264
福井孝志	北海道大・情報科学	264
星陽一	東京工芸大学	264
前橋兼三	大阪大・産研	264
宮崎誠一	名古屋大・院工	263
森田清三	大阪大・院工	264
安江常夫	大阪電通大	264
山崎聡	産総研	264
山田豊和	千葉大・院融合科学	264
山元 隆志	東レ	264
吉村雅満	豊田工大・院工	264

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第 39 期 第 2 回 幹事会議事抄録

日時: 平成 22 年 9 月 15 日(水) 12:00 ~ 12:40

場所: 場所: 長崎大学 教育学部 2F 23 番教室

〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14

参加者(28名+顧問1名): 市川 昌和、小川 真一、河津 璋、河原 敏男、住友 弘二、
曾根 逸人、高桑 雄二、中原 仁、中村 雅一、福井 孝志、星 陽一、前橋 兼三、
宮崎 誠一、安江 常夫、山崎 聡、荻野 俊郎、影島 博之、財満 鎮明、
佐藤 信太郎、大門 寛、中村 芳明、長谷川 剛、平山 博之、宮田 典幸、
村岡 浩一、山部 紀久夫、渡邊 孝信、渡部 平司、魚住 清彦(顧問)

委任状(27名): 飯島 善時、一宮 彪彦、木村 健二、越川 孝範、重川 秀実、重里 有三、
鈴木 真理子、田中 悟、田部 道晴、内藤 正路、森田 清三、吉村 雅満、
岡田 正道、大西 洋、神谷 利夫、喜多 浩之、坂間 弘、佐々木 正洋、須藤 孝一、
田中 啓一、寺地 徳之、土佐 正弘、中嶋 健、橋詰 富博、古川 貴司、三宅 晃司、
目良 裕

欠席(4 名): 大泊 巖、小高 秀文、笹川 薫、本間 芳和

配布資料

- (1) 第 39 期第 2 回幹事会議事予定
- (2) 第 38 期第 6 回、第 39 期第 1 回幹事会議事録(案)
- (3) 第 16 回ゲートスタック研究会案内
- (4) IWDTF-11 2nd Call for Papers
- (5) 薄膜・表面物理分科会第 40・41 期幹事候補者募集
- (6) 平成 23 年春季 応用物理学会シンポジウム企画案
- (7) 第 15 回 電子デバイスにおける原子輸送・応力問題研究会 開催報告
- (8) 走査プローブ顕微鏡 24
- (9) 第 11 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会

議事要旨

- (1) 前回議事抄録案の確認を行い承認した。(資料 2)
- (2) 渡邊幹事より第 39 回薄膜・表面物理基礎講座の進捗状況報告があった。この中で、
前回幹事会で提案されたディスカッションタイムの設定について、講師スケジュール
の関係で明示的な時間は割いていないが、運用面で講師への質問を出しやすい
環境を整える方針であることが説明された。
- (3) 大門企画幹事より平成 23 年度春季応用物理学会におけるシンポジウム案(資料 6)
の提示があり、基本路線は承認された。なお、講師が Spring-8 関係者だけで構成
されている点の指摘があった。
- (4) 前回幹事会で承認した顧問の新設に関わる分科会内規の変更に際して、分科会
規定の変更を要する旨の指摘が学会本部よりあり、この変更案(「幹事会が必要と
認めた時は副幹事長(2 名以内)【他】をおくことができる。」と【他】を追加)が 7 月理

事会で承認されたことが、山崎幹事長より報告された。また、これを受けて前回承認された内規が正式に効力を持つようになったことが説明された。

- (5) 前回の内規改正では、顧問幹事の任期について明示されていなかったが、学会本部より任期を明記した方がよいとの指摘があり、第28項に「顧問の任期は1年とし、幹事会の承認により、再任も可とする。」との文言を追加することが承認された。
- (6) 第40・41期の幹事候補募集について、資料5の案内がNews Letter No.139に掲載されたことが山崎幹事長より報告された。また、若手幹事を増やすための推薦を積極的に行って欲しいとの依頼があった。
- (7) 電子デバイスにおける原子輸送・応力問題研究会が7月に横浜で開催されたことが、小川企画幹事より報告された(資料7)。会計報告は次回に行われる予定である。なお、来年度は国内研究会の代わりに国際ワークショップとして開催することが報告された。
- (8) 本年度の走査プローブ顕微鏡研究会が資料8に示したように12月に熱川で開催されることが、中原庶務幹事より報告された。
- (9) 渡辺企画幹事より、今年度ゲートスタック研究会(資料3)およびIWDTF-11(資料4)が来年1月に同時開催となることが報告された。
- (10) 本年度のイオンビームによる表面・界面解析特別研究会(資料9)が12月に名城大学において開催されることが、木村幹事の代理である鈴木基史氏より報告された。
- (11) 大門企画幹事より本年度の表面ナノ科学シンポジウムが来年1月に雫石で行われることが報告された。なお、昨年度シンポジウムの収支は本分科会からの支出を行うことなく完了したことが口頭で説明されたが、資料準備の不手際があったため、正式報告は次回行うこととした。
- (12) ACSIN 国際会議について、本分科会における責任担当者が明確でないことが明らかとなり、準備基金管理委員会の委員長(分科会副幹事長)がその責を負うのではないかと指摘があった。
- (13) News Letter No.139 が現在印刷・発送中であることが、中原庶務幹事より報告された。
- (14) 第38回薄膜・表面物理セミナーの実施報告が山崎幹事長より行われた。正式な会計報告は次回行う予定であるが、ぎりぎり黒字会計であったことが口頭で説明された。

以上

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第 39 期 第 3 回 幹事会議事抄録

日時: 平成 22 年 10 月 16 日(土) 16:00-17:00

場所: 産総研秋葉原事業所 11001 室

〒101-0021 東京都千代田区外神田1-18-13 秋葉原ダイビル 11F

電話: 03-5298-4721(代表)

参加者 (9 名): 一宮彪彦 (名大)、小川真一 (産総研)、鈴木真理子 (東芝)、曾根逸人 (群馬大)、中原仁 (名大)、
山崎聡 (産総研)、大門寛 (奈良先端大)、寺地徳之 (物材機構)、山部紀久夫 (筑波大)

委任状 (45 名): 飯島善時 (日本電子)、市川昌和 (東大)、大泊巖 (早大)、河原敏男 (中部大)、木村健二 (京都大)、
越川孝範 (大阪電通大)、重川秀実 (筑波大)、重里有三 (青山学院大)、住友弘二 (NTT)、高桑雄二 (東北大)、
田中悟 (九大)、田部道晴 (静岡大)、内藤正路 (九工大)、中村雅一 (千葉大・工)、福井孝志 (北海道大)、
星陽一 (東京工芸大学)、前橋兼三 (阪大)、森田清三 (阪大・院工)、安江常夫 (大阪電通大)、
吉村雅満 (豊田工大)、岡田正道 (ソニー)、大西洋 (神戸大)、荻野俊郎 (横国大)、影島博之 (NTT)、
財満鎮明 (名大)、坂間弘 (上智大)、笹川薫 (コベルコ科研)、佐々木正洋 (筑波大)、佐藤信太郎 (産総研)、
須藤孝一 (阪大)、田中啓一 (SII ナノテクノロジー)、土佐正弘 (物材機構)、中嶋健 (東北大)、中村芳明 (阪大)、
橋詰富博 (日立)、長谷川剛 (物材機構)、平山博之 (東工大)、古川貴司 (日立ハイテク)、本間芳和 (東理大)、
三宅晃司 (産総研)、宮田典幸 (産総研)、村岡浩一 (東芝)、目良裕 (東大)、渡邊孝信 (早大)、
渡部平司 (阪大)

欠席 (5 名): 小高秀文 (旭硝子)、河津璋 (東理大)、宮崎誠一 (広島大)、神谷利夫 (東工大)、喜多浩之 (東大)

(以上 敬称略)

配布資料 (番号は資料番号)

- (1) 第39期第3回幹事会議事予定
- (2) 第39期第2回幹事会議事録(案)
- (3) 第38-39-40期幹事名簿
- (4) 第40-41期幹事候補者について
- (5) 2011年度分科会会計予算書
- (6) ICACS-25国際会議主催のお願い/主催申請書

報告および協議

- (1) 前回議事抄録案の確認を行い承認した(資料 2)。
- (2) 第 40-41 期幹事候補に関して、山田豊和(千葉大)氏から自薦があり、大泊幹事から次期幹事辞退の連絡があったことが報告された(資料 3, 4)。また、幹事会において一宮幹事から次期幹事辞退の表明と、長谷川修司(東大)氏を推薦予定(本人承諾は次回幹事会までに得る予定)である旨が示された。これを受けて、次期新幹事として山田豊和氏と長谷川修司氏を候補に加える方針が了承され、併せて、大泊幹事と一宮幹事を顧問に推薦することを承認した。なお、現時点では 1 名の空席があるため、ACSIN 関係の方を市川幹事から推薦して頂くか、企業関係の幹事をどなたか推薦する方向で調整を行うこととなった。
- (3) 2011 年度分科会予算案について、小川幹事より報告が行われた(資料 5)。基本的には本年度予算と同様 100 万円程度の赤字を想定した予算であり、現在は繰越金で賄えるものの、会員の増加、News Letter 出版方法の見直しといった対策を進めていく必要があるとの認識が示された。
- (4) ICACS-25 を応物で主催する件に関して(資料 6)、薄膜・表面物理分科会として申請することが承認された。
- (5) 表面ナノ科学シンポジウム(SSNS'10)の収支報告が大門幹事より行われた。この中で、昨年

度は応物及び分科会の活性化支援金は使用せず、学振の日中韓フォーサイト事業から支援を受けたことが報告された。

- (6) 山崎幹事長より理事会報告があり、JJAP は論文品質を確保するために掲載件数を減らす方針であること、APEX は一定期間自由に閲覧できるようにしてインパクトファクターを上げること、活性化支援金を新規事業に重点的に配分する方針であること、分科会規定を見直し中であること、既に周知しているとおり分科会が運営する国際会議は応物主催とするが、分科会が中心となって運営していることを対外的に示すことは差し支えないこと、応物-MRS の共同開催シンポジウムを秋の応物で開催する予定であること、公益法人かは順調に進んでいること等が報告された。
- (7) 次回幹事会は、常任幹事会と併せて 11 月 27 日開催とすることとした。

以上

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第 39 期 第 3 回 常任幹事会議事抄録

日時: 平成 22 年 10 月 16 日(土) 14:00-16:00

場所: 産総研秋葉原事業所 11001 室

〒101-0021 東京都千代田区外神田1-18-13 秋葉原ダイビル 11F

電話: 03-5298-4721(代表)

参加者 (9 名): 山崎聡 (産総研)、山部 紀久夫 (筑波大)、中原仁 (名大)、喜多浩之 (東大)、
小川真一 (産総研)、鈴木真理子 (東芝)、寺地徳之 (物材機構)、曾根逸人 (群馬大)、
大門寛 (奈良先端大)

委任状 (4 名): 前橋兼三 (阪大)、佐藤信太郎 (産総研)、影島博之 (NTT)、渡部平司 (阪大)

欠席 (1 名): 小高秀文 (旭硝子)

(以上 敬称略)

配布資料 (番号は資料番号)

- (1) 第39期第3回常任幹事会議事予定
- (2) 第39期第2回常任幹事会議事録(案)
- (3) 第38-39-40期幹事名簿
- (4) 第40-41期幹事候補者について
- (5) 2011年度分科会会計予算書
- (6) 第40回薄膜・表面物理基礎講座企画方針
- (7) News Letter No.140 目次案
- (8) ICACS-25国際会議主催のお願い/主催申請書
- (9) SSNS'10 決算報告
- (10) SSNS'11開催案内
- (11) 第39回薄膜・表面物理セミナー企画案
- (12) 平成23年春季 応用物理学会シンポジウム企画案

報告および協議

- (1) 前回議事抄録案の確認を行い承認した(資料 2)。
- (2) 第 40 回薄膜・表面物理基礎講座の企画方針案が喜多幹事より示され(資料 6)、内容を議論した。開催期間を 1 日とするか 2 日とするかは、2 日開催で 1 日のみの参加費を設定した本年度の状況を踏まえて決定することとした。テーマについて、「ナノ電子デバイス研究」を明示すると分野制限をしてしまい、参加者を限定してしまうのではないかとの指摘があった。また、X 線や SPM による評価方法を加えてはどうかという提案があった。
- (3) 第 40-41 期幹事候補者については、幹事会の場で議論を行った(第 3 回幹事会議事抄録参照)。
- (4) 2011 年度分科会予算案について、小川幹事より報告が行われた(資料 5)。基本的には本年度予算と同様 100 万円程度の赤字を想定した予算であり、現在は繰越金で賄えるものの、会員の増加、News Letter 出版方法の見直しといった対策を進めていく必要があるとの認識が示された。
- (5) 第 39 回薄膜・表面物理基礎講座の進捗状況について、山崎幹事長より予定どおり 11/25、26 日開催で進めていることが報告された。

- (6) 第39回薄膜・表面物理セミナーの企画案が、曾根幹事より示され(資料11)、内容を議論した。開催時期に関して、本年度は準備の都合で8月開催としているが、例年は6月開催しており、セミナーの宣伝等のスケジュールから6月開催としたほうがよいとの指摘があった。開催場所は東大、産総研(お台場)、筑波大(秋葉原)といった候補が挙げられた。また、陽極酸化による深穴加工や放射光リソグラフィなど加工関連をもう少し充実させてはどうかとの提案があった。本件に関しては、次回常任幹事会までにメールベースで素案を詰めることとした。
- (7) 平成 23 年春季応用物理学会シンポジウムに関して、大門幹事より最終案が示された(資料12)。今回は応用物理学会と物理学会が二日目から重なっているため、シンポジウム開催希望日は初日午後とすることで進めることとなった。また、イントロを15分程度に拡大し、シンポジウム趣旨に加えて放射光技術の現況紹介等を含めてはどうかとの提案があった。また、最後に簡単な closing remarks を加えることも提案された。
- (8) News Letter No.140 について(資料 7)、巻頭言は早稲田大学の河原田先生に依頼し、研究と最新技術情報は基礎講座から数件抜粋することとした。また、研究室紹介は山部副幹事長に依頼することとした。その他、研究会概要報告に LSI 配線研究会を加える。なお、広告の掲載ページ数について、会費の口数に合わせて複数ページを受け付けるという方針で運用することとした。
- (9) ICACS-25、SSNS に関しては、幹事会の場で議論を行った(第3回幹事会議事抄録参照)。
- (10) 次回常任幹事会は、幹事会と併せて11月27日開催とすることとした。

以上

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第39期 第4回 幹事会議事抄録

日時: 平成 22 年 11 月 27 日(土) 16:50-18:00

場所: 産総研秋葉原事業所 11001 室

〒101-0021 東京都千代田区外神田1-18-13 秋葉原ダイビル 11F

電話: 03-5298-4721(代表)

参加者 (13 名): 小川 真一 (産総研)、鈴木 真理子 (東芝)、曾根 逸人 (群馬大)、中原 仁 (名大)、
星 陽一 (東京工芸大学)、前橋 兼三 (阪大)、山崎 聡 (産総研)、影島 博之 (NTT)、
喜多 浩之 (東大)、大門 寛 (奈良先端大)、本間 芳和 (東理大)、
山部 紀久夫 (筑波大)、渡部 平司 (阪大)

委任状 (41 名): 飯島 善時 (日本電子)、市川 昌和 (東大)、一宮 彪彦 (名大)、大泊 巖 (早大)、
河原 敏男 (中部大)、木村 健二 (京都大)、越川 孝範 (大阪電通大)、
重川 秀実 (筑波大)、重里 有三 (青山学院大)、住友 弘二 (NTT)、田中 悟 (九大)、
田部 道晴 (静岡大)、内藤 正路 (九工大)、中村 雅一 (千葉大・工)、
福井 孝志 (北海道大)、宮崎 誠一 (名大)、森田 清三 (阪大・院工)、
安江 常夫 (大阪電通大)、吉村 雅満 (豊田工大)、岡田 正道 (ソニー)、
大西 洋 (神戸大)、荻野 俊郎 (横国大)、財満 鎮明 (名大)、坂間 弘 (上智大)、
笹川 薫 (コベルコ科研)、佐々木 正洋 (筑波大)、佐藤 信太郎 (産総研)、
須藤 孝一 (阪大)、田中 啓一 (SII ナノテクノロジー)、寺地 徳之 (物材機構)、
土佐 正弘 (物材機構)、中嶋 健 (東北大)、中村 芳明 (阪大)、橋詰 富博 (日立)、
長谷川 剛 (物材機構)、平山 博之 (東工大)、古川 貴司 (日立ハイテク)、
三宅 晃司 (産総研)、宮田 典幸 (産総研)、村岡 浩一 (東芝)、渡邊 孝信 (早大)

欠席 (5 名): 小高 秀文 (旭硝子)、河津 璋 (東理大)、高桑 雄二 (東北大)、神谷 利夫 (東工大)、
目良 裕 (東大)

(以上 敬称略)

配布資料 (番号は資料番号)

- (1) 第 39 期第 4 回常任幹事会議事予定
- (2) 第 39 期第 3 回常任幹事会議事録(案)
- (3) 第 40-41 期幹事候補リスト
- (4) 平成 23 年春季応物シンポジウム申込書
- (5) 表面・ナノ科学シンポジウム 2010 会場収支・前渡金精算書
- (6) 第 15 回電子デバイス特別研究会最終決算
- (7) 第 38 回薄膜・表面物理セミナー開催報告
- (8) 第 38 回薄膜・表面物理セミナー収支決算(案)

報告および協議

- (1) 前回議事抄録案の確認を行い、1 カ所の誤記修正を行うことで承認した(資料 2)。
- (2) 第 40-41 期幹事候補に関して、資料 3 に示した候補に加え、欠員 1 名枠に山本氏@東レを
大至急打診し、事務局締め切りに間に合えば候補に加えることとなった。
- (3) 喜多会計幹事が来年 1 月中旬から 7 月中旬まで海外派遣となることに関連して、会計幹事
の交代を検討したが、派遣時期の会計業務はメールベースで十分に対応可能であるという
ことで、引き続き会計を担当することとなった。
- (4) 来年春の応物シンポジウムが資料 4 に示した通り申し込まれ、学会初日を開催希望日とした

ことが報告された。

- (5) 表面ナノ科学シンポジウム(SSNS'10)の収支報告(資料 5)が大門企画幹事によって行われ、205,286 円の黒字となったことが報告された。なお、資料は現在事務局で確認中であり、確定版ではない。
- (6) 第 15 回電子デバイス研究会の最終決算報告(資料 6)が小川企画幹事によって行われ、992 円の赤字であることが報告された。
- (7) 第 38 回薄膜・表面物理セミナーの開催報告と収支報告(資料 7, 8)が小川企画幹事によって行われ、6109 円の黒字であることが報告された。なお、決算書類は現在事務局確認中である。
- (8) 第 39 回薄膜・表面物理基礎講座の開催報告が山崎幹事長によって行われ、出席者数はおよそ 30 名、10 万円前後の赤字となる可能性があることが報告された。なお、正式な報告は次回に行う。
- (9) 本間幹事から、現在応用物理学会本会の将来像検討の中で、分科会のあり方、運営方法の検討が行われているとの報告があり、これに関する意見交換を行った。
- (10) 次回幹事会は、常任幹事会と併せて来年 2 月 5 日開催とすることとした。

以上

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第39期 第4回 常任幹事会議事抄録

日時: 平成 22 年 11 月 27 日(土) 15:00-16:45

場所: 産総研秋葉原事業所 11001 室

〒101-0021 東京都千代田区外神田1-18-13 秋葉原ダイビル 11F

電話: 03-5298-4721(代表)

参加者 (11 名): 小川 真一 (産総研)、影島 博之 (NTT)、喜多 浩之 (東大)、鈴木 真理子 (東芝)、
曾根 逸人 (群馬大)、大門 寛 (奈良先端大)、中原 仁 (名大)、前橋 兼三 (阪大)、
山崎 聡 (産総研)、山部 紀久夫 (筑波大)、渡部 平司 (阪大)

委任状 (4 名): 佐藤信太郎 (産総研)、寺地徳之 (物材機構)

欠席 (1 名): 小高秀文 (旭硝子)

(以上 敬称略)

配布資料 (番号は資料番号)

- (1) 第39期第4回常任幹事会議事予定
- (2) 第39期第3回常任幹事会議事録(案)
- (3) 第40回薄膜・表面物理基礎講座企画方針
- (4) 第40-41期幹事候補リスト
- (5) 第39回薄膜・表面物理セミナー企画案
- (6) News Letter No.140 目次案

報告および協議

- (1) 前回議事抄録案の確認を行い、2カ所の誤記修正を行うことで承認した(資料 2)。
- (2) 喜多会計幹事が来年 1 月中旬から 7 月中旬まで海外派遣となることに関連して、来年度の会計担当をどのようにするか議論が行われたが、派遣時期の会計業務はメールベースで十分に対応可能であるということで、引き続き会計を担当することとなった。
- (3) 第 39 回薄膜・表面物理セミナー企画案(資料 5)が曾根幹事より示され、内容を議論した。前回議論をふまえて加工関連講演を追加したが、このうち(5)は松井先生@兵庫県立大、(6)は 3D アトムプローブによる半胴体デバイス解析、(7)は森田先生@阪大に差し替えて進めることとなった。表題は「次世代ナノテクのためのナノ計測・加工技術」、副題なしの線で進める。開催時期は 6 月、産総研(お台場)開催とすることになった。
- (4) 第 40 回薄膜・表面物理基礎講座の企画方針案が喜多幹事より示され(資料 3)、内容を議論した。本年度の状況を踏まえて開催日数は 1 日とし、表面科学会の基礎講座など類似セミナーの内容も調査して特徴ある講演内容となるよう調整を行う。開催時期は 10 月開催も視野に調整を行う。
- (5) News Letter No.140 について(資料 6)、日程が確定していない春のシンポジウムプログラム掲載を見送る以外は資料に沿って進めることとなった。
- (6) 来年秋のシンポジウム企画担当は、中原幹事、寺地幹事とし、早急に素案を練ることとなった。
- (7) 第 40-41 期幹事候補者(資料 4)について、資料に示した候補に加え、欠員 1 名枠に山本氏@東レを大至急打診し、事務局締め切りに間に合えば候補に加えることとなった。
- (8) 次回常任幹事会は、幹事会と併せて来年 2 月 5 日開催とすることとした。

以上

「ニュースレター」投稿規定

ニュースレターは、応用物理学会薄膜・表面物理分科会が原則として年3～4回発行する学会誌で、薄膜・表面物理に関する原著論文、解説、分科会活動の要約、及びその他の記事を掲載する。尚、当分の間、分科会常任幹事会がニュースレター編集委員会を兼ねるものとする。

1 記事の種類とその刷り上がりの長さ

- 1.1 研究：薄膜・表面物理に関するオリジナルな内容を含む研究論文。従来の「論文」の型にとらわれず、装置、手法、問題点などに関して有益な情報を含むものを取りあげる。図、表を含めて刷り上がり10ページ以内を原則とする。
- 1.2 解説：一般性のあるテーマについて、専門分野以外の読者にも分かり易いことを考慮して解説したもの。図、表を含めて刷り上がり6ページ以内を原則とする。
- 1.3 ノート：実験、理論のアイデア、コツなど論文では表に出ないような有益な情報。
- 1.4 寄書：薄膜・表面物理、及び、分科会活動に関する見解や意見。
- 1.5 談話室：分科会会員の意見交換、相互理解のための広い範囲の記事。
- 1.6 掲示板：分科会の行事予定、活動報告など。

2 投稿者の資格

投稿者は、分科会会員でなければならない。著者が複数の場合はその中の一人は必ず分科会会員でなければならない。但し、編集委員会が認めた場合はこの限りではない。

3 執筆要領

- 3.1 原稿の順序は、表題、著者氏名、所属機関とその住所、アブストラクト、本文、引用文献、著者紹介(20×25 mm²の写真付)とする。表題、著者氏名、所属機関とその住所は、その英文表記をE-mailアドレスとともに、第1ページの脚注として記す。
- 3.2 原稿は、ワードプロセッサを用いて作成した電子ファイル(PDF, MS-word)での提出を原則とする。印刷した原稿(カメラレディ原稿)でも受け付ける。
- 3.3 原稿は、A4用紙の上下に25mm、左右に20mmの余白を取り作成する。
- 3.4 原稿の書き方は「応用物理」執筆要項に準ずる。薄膜・表面物理分科会webページに掲載のテンプレートを参照のこと。
http://annex.jsap.or.jp/tfspd/activity/guide_author.html

4 原稿の閲読及び校正

- 4.1 投稿された全ての原稿は、閲読の後掲載の可否を編集委員会で決定する。閲読の結果、原稿の修正を求めることができる。
- 4.2 著者校正は、著者が希望した場合に初稿のみについて行う。
- 4.3 投稿者は、原稿の控えを手元に保存すること。提出された原稿、フロッピーディスクは原則として返却しない。

5 投稿料及び原稿料

投稿料は無料とする。編集委員会から依頼した原稿に対する原稿料は支払わない。

6 投稿の手続き

投稿者は、連絡先、原稿の種類を示したカバーレターを添え、原稿一部を下記に送付する。
〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-3 井門九段北ビル
応用物理学会 薄膜・表面物理分科会ニュースレター編集委員会

7 著作権、転載の許可

本ニュースレターに掲載された記事の著作権は分科会に所属する。

薄膜・表面物理分科会

常任幹事名簿 (第 39 期:2010.4.1 - 2011.3.31)

担 当	氏 名(所属)	E-mail/Phone/Fax	*39-40 期
幹事長	山崎 聡 (産総研・エネルギー技術研究部門)	s-yamasaki@aist.go.jp	
副幹事長	山部 紀久夫 (筑波大・数理物質科学研究科)	yamabe@esys.tsukuba.ac.jp	*
庶務幹事	中原 仁(名大・院工)	nakahara@nagoya-u.jp	
	前橋 兼三(大阪大・産研)	maehashi@sanken.osaka-u.ac.jp	*
会計幹事	小川真一 (半導体先端テクノロジーズ)	shin29_ogawa@ybb.ne.jp	
	喜多 浩之(東京大・院工)	kita@adam.t.u-tokyo.ac.jp	*
編集幹事	鈴木真理子 (東芝・研究開発センター)	mariko.suzuki@toshiba.co.jp	
	寺地 徳之(物質・材料研究機構)	TERAJI.Tokuyuki@nims.go.jp	*
企画幹事	小高秀文(旭硝子・中央研究所)	hidefumi-odaka@agc.co.jp	
	佐藤信太郎(富士通)	sato.shintaro@jp.fujitsu.com	
	渡部平司(大阪大・院工)	watanabe@mls.eng.osaka-u.ac.jp	(広報)
	影島 博之(NTT・物性基礎研)	kages@will.brl.ntt.co.jp	*
	大門 寛(奈良先端大・物質創成)	daimon@ms.naist.jp	*
	曾根 逸人(群馬大・院工)	sone@el.gunma-u.ac.jp	*(広報)
事務局	伊丹 文子(応用物理学会)	divisions@jsap.or.jp 03-3238-1043 / 03-3221-6245	

会員数, 賛助会社名

会員数 2011 年 3 月 16 日現在

A 会員: 52 名

B 会員: 674 名

計 726 名

賛助会社名

アジレント・テクノロジー(株)	(株)アルバック	オミクロン ナノテクノロジー ジャパン(株)
オリンパス(株)	北野精機(株)	(株)神戸製鋼所
コスモ・テック(株)	サイバネットシステム(株)	(有)テク
(株)東芝 研究開発センター	東洋製罐(株) 開発本部	巴工業(株)
日本カニゼン(株)	日本電子(株)	(株)日本レーザー
(株)日立製作所 中央研究所	(株)富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター	三菱マテリアル(株) 中央研究所
(株)明電舎 総合研究所	(株)ユニソク	

20 社 23 口

薄膜・表面物理分科会では、
 夏季セミナー（7 月）
 基礎講座（旧土曜講座，10 月）
 特別研究会（最近では，ゲートスタック，表面・ナノ科学シンポジウム，
 LSI 配線, ICSPM, イオンビーム研究会）
 などを開催しています。これらの会を取り上げるべきテーマについてのご意見や，
 具体的な企画案を企画担当常任幹事までお寄せ下さい。
 過去の会におけるテキスト等の残部がありますので，ご入用の方は，事務局
 （伊丹）までお問い合わせ下さい。会の一覧などの詳細は，ホームページをご覧
 ください。（<http://annex.jsap.or.jp/tfspd/>）
 当分科会発行の「News Letter」を会員の方々の一層のお役に立てるべく，企業
 広告を掲載することにいたしました。詳細は編集担当幹事または事務局（上村）
 までお問い合わせ下さい。

編集後記

この度の東北地方太平洋沖地震により被災されました方々に、心よりお見舞い申し上げます。

本会に所属されておられます多くの会員の方々におきまして、今号がお手元に届く頃にはまだまだ復旧に向けてお忙しいことと思われます。一日も早く研究活動が再開できることをお祈り申し上げます。

さて、平成 22 年度最後となります News Letter をお届けします。今回も、事務局の伊丹さん、上村さん、ご寄稿くださいました皆様、会員の皆様、幹事会、常任幹事会の皆様にご協力いただき、なんとか発行にこぎつけることができました。皆様に厚く御礼申し上げます。色々と不手際がありましたが、なんとか編集幹事の職責を果たすことができたと思っております。1 年間ありがとうございました。

今号では、早稲田大学の大泊先生より「意気消沈シンドロームから脱却しよう」というタイトルで巻頭言をいただきました。研究論文としましては、11 月 25 日、26 日の 2 日間にわたって早稲田大学西早稲田キャンパスで開催された薄膜・表面物理基礎講座「いまさら訊けない 太陽電池のための薄膜形成・分析技術」のご講演から 2 件の論文を掲載させていただきました。最新技術情報には九州大学大学院工学研究院の本岡先生の「CIGS 太陽電池における欠陥準位評価法（電気・光学測定）の紹介」を掲載させていただきました。談話室では、大阪大学大学院工学研究科の渡部夫先生に、研究室を紹介していただきました。また、連載記事としてご好評をいただいております「科学英語一言メモ」では「現在完了」と「過去形」の使い方についてご解説いただきました。

News Letter をさらに充実した内容にし、会員の皆様の研究や交流により役立つよう、ご意見、ご投稿をお待ちしております。学会誌とちがい、会員の皆様に身近な情報誌としての役割を果たそうと思っていますので、皆様からの積極的な投稿をお待ちしています。来年度から編集幹事が寺地徳之氏に代わりますが、今後とも、ご支援・ご協力をお願いいたします。

編集担当常任幹事 鈴木 真理子 記

応用物理学会 薄膜・表面物理分科会

NEWS LETTER No.141

（無断転載を禁ず）

発行日 2011 年 3 月 18 日

発行 社団法人 応用物理学会

編集 社団法人 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会
〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-3 井門九段北ビル
E-mail divisions@jsap.or.jp

ホームページ <http://annex.jsap.or.jp/tfspd/>

幹事長 山崎 聡（産業技術総合研究所）

編集担当幹事 鈴木 真理子（東芝）

寺地 徳之（物質・材料研究機構）