

卒業研究およびその教育目標 (MOS 太陽電池製作研究の場合)

水野 善允*

Graduation Study and its Educational Aims
(In Case of MOS Type Solar Cell Productions)

Yoshichika MIZUNO

Abstract

In this paper, the educational effects and the aims of the graduation study are presented by looking back my experiences and the behaviors of the students for the joyful and sever studies. The MOS type solar cell production was offered to the students as a graduation study for this decade. The educational aims of this production are that the students would learn the physical and electrical basic informations by the way of piling up the study of the basic experiments and that the higher efficient MOS solar cell would come to the front.

Keywords : Educational Aims, Duty of national colleges of technology, Graduation study, Mos solar cell

1. 序論

科学技術創造立国日本。基礎研究の遅れが言われて久しい日本ではあるが、今年度南部陽一郎、小林誠、益川敏英、下村脩の4氏がノーベル賞を受賞した。彼らが主要な研究業績を挙げたのは30歳前後であった。湯川秀樹の中間子理論(1934年)は27歳であった。戦前、戦後の若き研究者達の活躍は目覚しかった。良き指導者に恵まれたこと、研究環境がすばらしかったことが挙げられる。この良き環境下での若い世代の活躍が技術大国日本を支える。

わが国の若手技術者育成に大きな役割を果たすことへの期待が大きい高等専門学校は小規模ながらユニークな教育システムで、教育目標が明確である¹⁾。高専は制度創設以来40年以上を経過し、平成16年から独立行政法人となった。その間の世の中の移り変わりは激しく、社会からの要請も変化しており、15歳人口の減少や若者の理工系離れ、また厳しい行財政事情などの逆風もある²⁾。大学では、今年度50%以上が入学定員未達成と予想され、熾烈な大学間競争の様相を呈している。いまや、大学が学生を選ぶのではなく、受験生によって大学が選ばれる時代となり、序列化も一段と明確になりつつある。大学の諸制度についても規制緩和、そして自由市場原理の導入という基本視点のもと、制度の見直しが求められている。政府からの各大学に

対する補助金の交付についてもアメとムチの政策が行われ、大学間の格差が増大している。各大学とも、自らの特色を明確にし、その存在をアピールしなければならない³⁾。

高専を取り巻く環境も極めて苦しいと言わねばならない²⁾。以前は実践的技術者の輩出が目的であったが、現在は科学技術の進歩もあり、高専創設時とは目的を異にする。高専の意義は薄れている。高専は何をすべきか。生き残りをかけた戦いが始まっている。情報技術に強い高等専門学校、ものづくりの基礎分野で構成されている高等専門学校などの新しい高等専門学校の創設が挙げられている(本校教員会議資料)。高専の存在をアピールしたのは、東京都立高専と東京都立航空高専が統合した東京都立産業技術高専の副衛星「輝汐」であった。この副衛星を乗せた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」が今年1月23日にH2A ロケット15号機で打ち上げられた(北陸中日新聞)。現在レーザを使って推進実験を行っている「輝汐」は航空宇宙工学科航空宇宙コースと電子工学科情報通信コースの共同製作であった。本学科(本校電子制御工学科)はロボット製作に力を入れている。高専といえばロボットを想像すると受験生たちは言うが、それが彼らにとって魅力あるものであるかどうかは別問題である。若者たちのニーズは多様化している。多くの受験生に魅力ある学校と映らせるにはもっと特化されると良いのではな

*電子制御工学科(嘱託教授)

(平成21年3月31日受付)

いか。東京都立産業技術高専に習って、例えばロボット工学科あるいは機械工学科ロボットコースを新設し、どの高専にも負けないロボット技術、アシモのような頭脳ロボットの製作も可能な技術、国際ロボット競技会にも出展できる技術を育成する方法もある。そのためにはものづくり教育の講義、実習を大幅に増加させるカリキュラムを組む必要がある。教員一人のできる範囲は限られている。教員間、学科間の技術協力および学校の支援があれば、高専の技術力の高さ、素晴らしさを発信することができる。受験生たちに魅力ある学校と感じさせるには、多くの高専で行われている地域交流、海外交流、ものづくり、出張授業や地域連携事業は必要不可欠であるが、それだけでは特化されない。さらなる前進が必要である。生き残るためには特色の秀でた分野を構築し、宣伝効果をさらに挙げるのが肝要であると考えらる。

人工衛星、頭脳ロボットや太陽電池の製作には最先端技術を駆使するための専門基礎知識の習得が不可欠である。何世紀にも亘って発展し続けてきた機械工学も現在では電子工学、情報工学、有機化学工学、生物工学、環境工学の知識が必要となってきた。特にバイオへの関心は強い。流体力学関連では、空気や水、油のニュートン流体から血液流動などのバイオの流れ、非ニュートン流体の流れへと変わってきている。しかし、Ludwig Prandtl の境界層理論 (1904年)、翼理論、乱流理論などの流体基礎理論は今も揺るがない。専門基礎知識の習得が必要であり、これを身につけないことには開発も制限される。目的志向ではなく、基本的研究から産業界で芽が実るまで20年はかかり⁴⁾、基礎知識の重要性が指摘されている。現実に耐え得る製品を開発するためには、学生がもっと基礎的研究に目を向けなければならない。

本稿では、基礎的研究を積み重ねることによって最先端の専門基礎知識を身に付けることができる MOS (Metal Oxide Semiconductor) 型太陽電池製作を卒業研究のテーマとして課し、効率の良い太陽電池を製作することを最終目的とする。この楽しく厳しい研究に対する卒研生の取り組みおよび筆者の経験を回顧することによって、卒業研究が与える教育効果および今後の教育目標について言及する。

2. 高専教育

高専教育の目的は、現場で役立つ実践的な知識・技術の教育、主体性と品格のある専門家の育成、社会や企業において信頼されるリーダーとなる資質を身につ

けることである¹⁾。想像力、創造性豊かな実践的技術者の輩出を目指し、人間形成のための教育 (人材育成)、教育の質の向上、より高度な教育の実施、科学技術の習得、研究、専攻科の充実、社会や地域への貢献、コミュニケーション能力の向上を今後の学習・教育目標とする。地域への貢献については、地域連携の強化と共同教育の導入、地域と産業界との緊密な連携による先進的な教育システムの開発、社会に支援される教育機関、地域ニーズへの的確な対応と強化、イノベーション創出に向けた産官学連携と地域振興の促進、国際交流などが挙げられている。本校各学科の方針は、自主的・継続的に学習する能力を持つ人、主体的に行動できること、専門知識・技術を身につけたい人、研究・開発を担える高い技術力と豊かな想像性を身につけたい人、ものづくりを通してシステムを設計・構築したい人、創意工夫ができる技術者になって未来に貢献したい人、想像豊かなエンジニアになりたい人などである¹⁾。中央教育審議会答申では、科学技術の高度化に対応した学科のあり方の見直し、中堅技術者の養成から幅広い場で活躍する多様な実践的・創造的技術者の養成へ、施設・設備の更新・高度化、共同研究の促進などが挙げられている。これらの資料から読み取れるのは、社会経済環境の変化による進学率の上昇、地域連携強化の必要性の高まりがあり、多様化する生徒のニーズ、地域のニーズに応じた教育研究活動を強化し、教育の一層の向上を図っていくことを目標にしていることである。そのためには、地域の産業界などとの幅広い連携の促進、共同教育の充実、ものづくり技術力の継承・発展を担う技術者、イノベーション創出に貢献する技術者を輩出する必要があるが、職業に関する自発的かつ高度な知識・技能の育成が課題である (本校教員会議資料)。この課題を早急に実施すべく努力する必要があるのではないかと。

活躍できる最先端の専門基礎知識を学生に与えるために研究環境を充実させるのも高専の役割のひとつである。これからの時代に必要とされる創意工夫ができる技術者すなわち想像力を持った技術者、産業技術のニーズの方向を的確に捉える教育課程を編成し、教育内容の高度化を図ることである。将来の職業への明確な志を抱くことによって学習の意義を確かなものにし、社会のニーズに対して新しい技術を創意工夫できる知恵を持った技術者の育成が必要である²⁾。

知識は教えることができるが、知恵はこれを口で言い教えることはできない。知恵の「教育」をいかにして達成するか。言葉による形式知恵、頭脳知恵だけではなく、体験重視型の「暗黙知恵」を生む教育に取り組む

必要がある。高専教員の役割は教員一人ひとりの教育力向上、システム（組織）としての教育力の強化である。教職員の意識改革が伴わなければならない¹⁾。優秀な先生がいて優秀な学生が育ち、社会がそれを評価してさらに優れた教員と学生が集まる。今日の教育環境は真の学びの実現にはきわめて不健康な環境にある。教えるという仕事は投げた手に必ず舞い戻ってくるブーラメンである。教師と学生の関係を、共同して新たな知を探求するという方向にはではなく、両者を向き合わせ、学生を上から裁断する支配・被支配の関係を形成している。これでは個性的、創造的な学びやこれらを相互交流させる共同的な学びや探求は生まれるはずが無い。私たちはどう教えるかばかりに関心を注ぎ、人はどのように学ぶものなのかという問いを立てることが無かったのではないか。教えることによって学び、その学びを糧にしてまた教える。教えが有効であるためには、学び手に再構築の自由が許されなければならない。授業は知識の伝達ではなく、対話を通しての知識の探求の場への変容を要請されている⁵⁾。

高専での教育の実態はどうか。多くの学生がこれだけやれば卒業ができるであろうと安易に考えている。学生に真剣さが見られない。やる気をなくする学生、バイトなどに精を出す学生が多くいる。落第させないために成績の悪い学生の教育にかなりの時間が費やされている。何年前の一時期、高専機構の進める教育研究とは何かについての議論があった。教育と研究か、教育のための研究か、研究のための教育かについてであった。高専の使命は技術教育なのか、研究なのか。前進し続ける社会に対応するためには高度の先端技術を教授し、その知識を基礎にして研究開発が進められなければならない。学位を取得した新規採用教員は新しい情報を学生に伝えることができる。科学の進歩が著しい現在においては、工学の基礎に加えて新しい情報も教育する必要がある。勉強は学生がやるものであり、自ら進んで勉強しないことには身につかない。教員はその方向を示し、新しい情報を学生に提供しなければならない。現在全国高専での大学3年編入学生は5割を超える。大学での、さらには大学院へ進んだ学生たちの研究活動は大変厳しく、「大変なんだよ」と顔を青くして頑張っている。高専での教育をハイレベルにまで上げれば、やる気のある学生はより充実した大学生活を送れる。高専は優秀な人材を輩出するのほひとつの目的ではないのか。成績の良い学生をさらに勉強させないことには高専は発展しない。卒研担当者は卒研生をさらなる追求をする方向に持っていく必要がある。最先端の研究をさせることによって卒研生に夢

が生まれ、やる気が出てくる。卒研担当者は大変であるが、卒研生の夢を実現させる卒業研究も必要である。現在はそのような環境にない。休日に学校内を走り回っているのは部活動に精を出す学生だけで、卒研生も専攻科生もいない。寂しい限りである。

筆者は10年余本校電子制御工学科で主に電気磁気学、電子デバイスおよびシステム工学の講義を行った。電気磁気学は電気電子系の大学に編入する学生にとっては必修科目であり、大学では講義2年間、演習2年間が課せられている重要科目である。広範囲で難解な内容を含むこの科目を短時間の講義のみで説明することはできなかった。電気力線、磁力線、電磁波などは目で見るができない想像の世界であり、電子デバイス工学はマイクロメートル、ナノメートルの世界である。なぜその物理現象が起こるかを学生達に理解させるまでには至らず、覚えさせることになってしまった。目に見えないものを理解させることは大変難しく、実験が伴わなければ、とても理解できる内容ではなかった。物理現象を実感できる講義をしなければならなかったが、上からの押し付けになった。電子デバイスの講義は4年生で行われ、4年生の実験実習で太陽電池製作の基礎実験をテーマにして電子デバイスへの興味を持たせるように勤めた。興味を持った学生たちは卒業研究で頑張った。その後、電子デバイスの講義は5年生前期のみとなり、4年生の実験実習も太陽電池製作の基礎実験を一回のみ行うことになったため、電子デバイスに興味を持ち、卒研テーマとする学生は半減した。実験の必要性を痛感した。システム工学ではエネルギーシステムに関係する人口増加、化石エネルギーの枯渇および省エネについて講義した。2050年に世界人口は100億に倍増し、化石エネルギーは枯渇する。これらのテーマに対する学生の多くの考え方は「何とかかなるであろう」であった。学生にとっての幸せは何か。人間は夢を見る。アメリカンドリームに向けて努力するのほひとつの生き方であるが、大きな夢を見ることなく、現実を素直に受け入れて生きていこうとする学生たちが多かった。これでは日本沈没も間近かである。

3. 卒業研究背景

半導体デバイスの研究、開発が現在も精力的に行われている。1947年に William Bradford Shockley によって始めて点接触型トランジスタが発明されてから50年足らずの間に IC (Integrated Circuit)、LSI (Large Scale Integration)、超 LSI (Very Large Scale Integration) が出現し、シリコン (Si) 基板を使用し

た半導体デバイス製作は限界に来ている。デバイス素子の寸法はナノメートルに移り、現在ではシングルナノメートルが議論され、素子間分離ができない領域にまで達している。ビル1棟に納められた真空管式電子計算機は現在ではPC (Personal Computer) で十分対応できる。筆者の所属した大学の研究室に九九演算できる高価な電卓が初めて導入されたのは約40年前であった。それまでは計算尺、手回し計算機が主流であった。それでも研究は進んでいた。データ整理には九九演算ができる電卓があれば十分であった。シミュレーションするには大型計算機が必要であったが、この計算結果は信用できないと判断され、論文として掲載されることは少なかった。計算能力が足りなかったために飽くまで実験重視であった。現在はPCに頼るあまり、その基礎的実験研究が疎かにされている。

筆者は東京都立大学大学院工学研究科で加藤宏教授の指導により粘弾性流体中の円柱まわりの流れの研究を行った。東大宇宙航空技術研究所に設置されていた曳航水槽を岐阜大学工学部松井辰彌教授の紹介で見学し、長さ10m、幅1m、高さ0.6mの曳航水槽を1年近くかけて自らの手で建造した。微小圧力計は市販されておらず、都立大学の当時の年間授業料に匹敵する価格で新規参入業者から購入した。Peo (Poly ethylene oxide) 水溶液中で直径5~30cm、長さ50cmの円柱を曳航した。円柱まわりの流れの圧力分布を測定し、剥離点を求めた。真っ暗な深夜に水素気泡法で円柱後流の流れの写真撮影を行い、実験室にあった暗室で現像した。鮮明な写真を撮るのに苦労した。また、粘弾性流体中の円柱まわりの流れの数値解析を行った。粘弾性項を含むNS方程式 (Navier-Stokes equations) をRKG (Runge-Kutta-Gill) 法で計算した。プログラムの読み取りは黒の紙テープあるいはカードであった。カードの入った大きな段ボール箱を自転車の荷台に積んで、深沢校舎から大型計算機のある八雲校舎に運んだ。コンパイル作業も大変であった。利用者が多かったため、一度計算機に流すとその結果が出てくるまで一杯のコーヒーを飲みながら待たねばならなかった。プログラムや計算結果はプリンターに出力され、大量の用紙を運搬、保管しなければならなかった。大型計算機ではあっても計算能力は良くなかった。東大の大型計算機を利用することもできたが、使用料が高くて手が出なかった。これらの研究結果を機会学会福井地方講演会、全国大会で発表し、機会学会⁶⁾、JSME⁷⁾に投稿した。管内流れ、円板まわりや翼まわりの流れ、油圧ポンプ内の流れなどの研究が当時行われていた。ニュートン流体中でのこれらの流れの基礎的研究はす

でに終了し、流体の対象は粘弾性流体や乱流に移っており、新しい研究テーマを模索する時代であった。すでに確立されている基礎理論の基に過去と同様の手法を用いて新しい流体の物理現象を調べるという方向に飽き足らず、当時著しい進歩を遂げていた半導体関連の研究に移った。明治大学では植草新一郎教授の指導で半導体表面の研究を行った。クリーンルームを設営し、高価な赤外線イメージ炉 (約250万円) を導入して半導体基板上に絶縁膜を成膜した。常温でも空気に触れると発火する猛毒のジシラン (Si_2H_6) ガスボンベは、神奈川県からの危険物に対する通達により導入された高価なシリンダキャビネット (約2000万円) 内に収められた。排ガス処理装置は、筑波にある電子技術総合研究所 (現産業技術総合研究所) の排ガス処理装置を参考にして製作した。基板洗浄には劇物であるフッ酸 (HF) 水溶液を使用し、加熱温度を下げる (約400°C) ために、 Si_2H_6 ガスおよび純窒素ガスを使用して、絶縁膜である窒化シリコン (SiN) 膜を化合物半導体であるInP (Indium Phosphorus) 基板上に成長させ、C-V特性、I-V特性を測定し、C-V曲線から界面単位密度 (N_{ss}) を求めた。また、基板表面の酸化反応を調べるために、反応ガス流れの数値解析を行った。応用物理学会や国際会議で多くの発表をし、論文を投稿した^{8~15)}。しかし、電子デバイスの基礎研究は流体力学と同様にほぼ終了しており、現在では化合物半導体 (GaAs, GaN, AlN, SiC等) に希土類を添加した光変換素子の研究などの応用研究が精力的に行われている。今後の基礎研究の対象はバイオ、環境に向かっていく。機械工学科、電気・電子工学科という名称は大学ではすでに無くなってきている。「電子工学科という名称では今や学生が集まらない」とぼやく現場の先生方の話を耳にする。筆者が在籍した明治大学電子工学科は電気電子生命学科、光電子工学研究室はオプトバイオエレクトロニクス研究室となった。時代は激しく変遷し、著しい進歩を遂げている現実に驚異を覚える。

4. 卒業研究経緯

富山商船高専に移った10年前にどのような授業、卒業研究を行えば良いのかを考えた。卒業研究テーマとして、安価で、大きな設備がなくても製作できるが、光変換効率が低いために研究の対象とされていないMOS型太陽電池の製作を思い付いた。効率を上げれば特許を取れるのではないかと考えた。本校では10年間一貫してMOS太陽電池製作に励んだが、研究費や実験装置の不足などで遅々として研究は進まなかった。

筆者の前任者であった丹野和夫先生のご好意で、測定装置設置用の小面積クリーンルーム、ドラフトチャンバー2台、加熱炉2台、恒温水槽、光学顕微鏡、微分干渉顕微鏡、ワイヤーボンディング装置、膜厚測定器などを譲り受けたが、MOS 太陽電池製作には装置がまだ不足していた。

着任1年目(1998年度)は、数台の大型半導体デバイス製作装置の設置に欠かせない大面積のクリーンルーム設営から始まった。本校メカトロ実習室磐田技官の協力を得て、塵や埃の進入を防ぐためにアングルを組み、ビニルシートで実験室の約半分を仕切った。卒研生達は思わぬ大変な作業を手伝わされて驚いていた。丹野先生の置き土産である2台の加熱炉を改造して、熱電対(Thermocouple)で炉内温度分布を測定した。HF水溶液を使用してSi基板表面のエッチングを行い、光学顕微鏡および微分干渉顕微鏡で写真観察を行った。HFの取り扱いには気を配った。学生には取り扱い方法を十分に説明した。当卒研室に入ることになった学生達の行動をしばらくの間注意深く観察し、HF水溶液が使用できる学生を選定した。幸いにもドラフトチャンバーが2台あった。多くの大学研究室で使用されているように、このチャンバー内で注意深く作業を行えば問題はなかった。発注した合成石英製基板支持台を加熱炉に挿入し、恒温水槽で発生させた高温蒸気を炉内に流してスチーム酸化でSi基板上にシリコン酸化膜(SiO₂膜)を成長させた。膜表面を光学顕微鏡および微分干渉顕微鏡で観察し、富山県立大学春山研究室でレーザ顕微鏡による膜断面写真観察を行った。明治大学植草教授の許可を得てハイテクリサーチセンでDLTS(Deep Level Transient Spectroscopy)によるC-V(Capacitance - Voltage)特性測定を行い、MOS構造の静電特性を調べた。さらに、n形半導体を用いたMOSダイオードの理想的C-V曲線を計算させた。

着任2年目(1999年度)は、昨年に引き続いてスチーム酸化を行った。合成石英製Y字型流入路を業者に発注し、水蒸気を流入させる経路とSi基板を挿入する経路を別にした装置で実験を行い、昨年の結果との比較検討を行った。Si基板表面の鏡面状態を調べるために、基板表面研削用エッチング液の種類を変えて写真観察を行った。写真観察には本学科水谷研究室の走査電子型顕微鏡などをお借りした。常圧CVD(Chemical Vapor Deposition)装置の基板支持台がスライドできるように改造した。卒研生たちは本校実習工場で精力的に作業した。加熱温度、加熱時間、N₂ガスとO₂ガスの混合ガス流量比を変えてSiO₂膜を堆積させ、明治大学ハイテクリサーチセンターでC-V特性測定を行

った。また、長岡技科大と高専との交流集会で知り合うことができた秋山伸幸先生の紹介で、高田研究室のエリプソメータを使用して膜厚測定を行った。測定には岡元助手の親切で精力的な協力を頂いた。2月の大雪の日に卒研生2人を乗せて朝8時に出発し、昼過ぎから深夜まで測定した。この測定試料はその後の作製試料膜厚判定に必要な欠くべからざるものとなった。膜の酸化プロセスを理解させるためにSi酸化機構モデルを勉強させた。さらに、明治大学光電子工学実験室の陽極化成装置を参考にして、簡易型陽極化成セルを製作し、単結晶Siに比べて光閉じ込め効果の大きいPS(Porous Si)を単結晶Si基板上に形成させた。Si基板裏面にAl電極を蒸着する真空蒸着装置がなかったため、銀ペーストを塗布し、電流密度、化成時間、HF水溶液濃度を変えてPSを形成させ、試料表面の顕微鏡写真観察を行った。また、明治大学植草研究室の真空蒸着装置をお借りして、Al電極を蒸着した試料に対しても同様の実験を行った。

2000年度には校長裁量経費(250万円)を得て、減圧CVD装置、C-V測定装置(LCRハイテスタ、プログラマブル直流電圧/電流発生装置:R6144)、超純水器などを導入した。また、明治大学三浦先生から真空蒸着装置の部品などを譲り受け、苦勞して組み立てた。かなりの年代物でも500万円を下らないこの装置を安価に入手することができた。これらの装置の導入により、本実験室でMOSダイオードの製作および特性測定ができるようになった。本校に赴任した当初から考えていたMOS太陽電池製作に一步近づける状況になった。新たに導入した減圧CVD装置の炉内温度分布を測定した。本校商船学科島木先生にsmoke発生装置をお借りして、炉内ガス流れの写真観察を行った。このCVD装置には不備な点が多く、改良、改善に多くの時間を費やしたが、卒研生達はデータ取得失敗にもめげず、努力していた。C-V特性測定には表面電極を点電極にする必要があった。卒研生は苦勞して厚さ0.5mm、2cm角のステンレス板に直径1mmの穴を200個以上あけてマスクを製作した。このマスクはその後長い期間使用することになった貴重品であった。常圧CVD、減圧CVD法でMOSダイオードを製作した。本校教養学科寺崎先生の化学実験室から蒸留水を貰い受け、超純水器を使用して基板表面洗浄を行った。膜厚を変えてC-V特性測定を行い、電極のアニール(熱処理)依存性も調べた。また、前年度に続いて陽極化成を行い、真空蒸着装置でSi基板裏面にAl電極を蒸着した。アニール条件、溶液濃度と印加電圧を変化させてPSを形成し、基板表面を写真観察した。測

定器 R6144 を使用して I-V 特性測定 (Current - Voltage、電圧印加による電流の測定) を行った。真空蒸着装置は真空に引くまで 3~4 時間を要し、時間を短縮するために液体窒素 (温度 77K) が必要であった。液体窒素を封入する高価なデュアー瓶を本校情報工学科水本先生からお借りした。高岡市まで学生を引き連れて何回も液体窒素を取りに行った。長岡技科大秋山先生との間に本年度導入した減圧 CVD 装置を使用して基板上に膜を堆積させる共同研究の話があり、先生に当卒研究室へお越し頂いたが、実験装置改良にかなりの費用がかかり、断念せざるを得なかった。

2001 年度は MOS 太陽電池の製作に取り掛かった。減圧 CVD に比べて短時間で SiO₂ 膜を成長させることができ、実験データが蓄積されていた常圧 CVD 装置で n 形と p 形基板上に SiO₂ 膜を成長させて製作した MOS ダイオードの膜厚、C-V 特性測定を行い、前年度までのデータと比較した。p 形基板の SiO₂ 膜厚データがなかったので、再度長岡技科大高田研究室のエリプソメータをお借りし、岡元助手の協力を得て膜厚測定を行った。明治大学三浦研究室のスパッタ装置を借用し、光が通過する ITO (Indium Tin Oxide) 透明電極を堆積させて MOS 太陽電池を製作した。白熱電球で照射して短絡電流、開放電圧を測定した。作製した試料の分光感度特性を明治大学植草研究室で測定した。卒研究生はこれらの結果を本校で開催された電気関係学会北陸支部連合大会で発表した¹⁶⁾。発表学生は良い経験をし、自信を深めた。MOS 太陽電池の研究開始から 4 年目にして初めて学会で発表する機会を得た。高専からの発表が数少ない時代であった。昨年度に引き続き、常圧 CVD 法に比べて良好な SiO₂ 膜を成長できる減圧 CVD 法で MOS ダイオードの膜厚、C-V 特性測定を行い、昨年度の結果と比較した。減圧 CVD 装置は真空保持用オーリングが高熱で溶けるなどの問題、基板裏面に成長した SiO₂ 膜の除去の問題などがあり、改良に多くの労力と時間を費やした。n 形半導体に代えて p 形半導体を用いた MOS ダイオードの理想的 C-V 曲線を計算させた。また、高齢化社会の到来に伴い増加する要介護者が自分の意思で行動できる車椅子を検討し、試作した。

2002 年度には校長裁量経費 (450 万円) で ITO 膜を堆積できる小型高周波スパッタ装置、電離真空計、化学天秤、人工太陽照明灯、ターボ分子ポンプなどを導入した。スパッタ装置は高周波電源を使用するため、アースは実験室のある 4 階から地下まで別配線となった。太陽電池の分光感度特性を調べる測定装置を本校水本先生からお借りした。さらに、減圧 CVD 装置の

真空保持用オーリング溶融を阻止する水冷装置、基板真空保持容器、光照射実験装置などを本校実習工場、メカトロ実習室で製作した。この年は卒研究生 6 名のうち半数が女子学生であったが、彼女たちは本校実習工場で旋盤を回して精力的に作業した。これらの装置の使用により、当卒研究室で MOS 太陽電池製作の全工程を行うことができる状況になった。文献調べは MOS ダイオードから太陽電池に移ったが、MOS 太陽電池についての文献はほとんど無かった。前年度導入した減圧 CVD 装置の炉内温度分布および炉内ガス流れの様子を調べ直した。再度 smoke 発生装置を島木先生にお借りした。加熱温度、加熱時間、酸素流量を変えて SiO₂ 膜を成長させ、真空蒸着装置で電極膜厚を変えて蒸着し、加熱炉で温度を変えてアニーリングを行った試料の C-V 特性測定を行って前年度の結果と比較した。また、表面電極を Au 電極から Au 薄膜電極に変えて MOS 太陽電池を製作した。光照射により生成される電荷を有効に取り出すためには絶縁膜である SiO₂ 膜を基板の一部に成長させる必要があり、本校メカトロ実習室柳原技官にマスクの製作を依頼した。全面電極を間隔の異なる櫛型電極、直径の異なる点電極に変えてショットキ Au 薄膜電極を基板上に堆積させ、その上に SiO₂ 膜を成長させた。さらにその上に、新たに導入したスパッタ装置を使用して、ITO 全面電極、櫛型電極を堆積させた。加熱温度、スパッタ時間を変えて堆積させた ITO 膜の光透過特性および抵抗特性を調べた。スパッタ装置の操作は 100 手順を超え、操作手順確立までに時間を要したが、MOS 太陽電池製作に取り組む卒研究生の意欲は衰えず、試験期間中も卒研究室に来ていた。膜成長させた試料に白熱電球、人工太陽照明灯を照射して MOS 太陽電池の短絡電流、開放電圧を測定した。さらに、太陽光とは異なる分光分布を示すハロゲンランプを照射して分光感度特性測定を行った。また、明治大学の植草研究室およびハイテクリサーチセンターでキセノン (Xe) ランプ照射による分光分布特性測定、DLTS 測定装置による I-V 特性測定を行った。当時まで主に n 形基板を使用していたが、高い光変換効率が期待できる p 形基板で同様の実験を行った。卒研究生はこれらの結果を電気関係学会北陸支部連合大会で発表した¹⁷⁾。努力して大量のデータを集積し、検討を行った学生は自信を持って発表し、質問にも的確に答えていた。光閉じ込め効果があり、光変換効率の大きい太陽電池製作が可能と考えられる良質の PS を形成させる陽極化成の実験を再開した。以前の実験データを参考にして、HF 濃度、電流密度、化成時間を変えて陽極化成を行った。陽極化成効果が

大きい p 形基板を主に使用して PS を形成させ、その上に表面電極として Au、Al の 2 層の薄膜を蒸着させた。電流密度の化成時間変化を調べ、形成された PS の微分干渉顕微鏡による観察を行った。また、PS 上に点電極を蒸着した試料に光照射して短絡電流を測定した。これらの結果を卒研学生は北陸地区学生による研究発表会で報告した¹⁸⁾。界面電荷の少ない良好な SiO₂ 膜を成長させることができる常圧 CVD 法による SiO₂ 膜成長を前年度に引き続いて行った。データ蓄積のため、SiO₂ 膜成長速度、膜成長最低加熱温度、流量費一定の場合の最少流量などを調べ、C-V 特性を測定した。また、要介護者の身長、体重を考慮し、車椅子の材質を検討して介護用車椅子の試作を行った。今回は油圧で上下駆動させて荷重を加えたときの駆動速度を測定した。

2003年度は前年度に引き続いて PS 上に SiO₂ 膜を成長させて製作した MOS 太陽電池の特性を調べた。PS 作製時に蒸着した Al 裏面電極を HCl 溶液で除去し、基板表面に減圧 CVD 法で成長させた SiO₂ 膜の一部を除去するためにエレクトロニックワックスを塗布する工程が加わった。エレクトロニックワックスの除去方法にも注意が必要であった。卒研生はイライラしながらも気力を振り絞って頑張っていた。このような仕事には努力と根気、さらには器用さが要求され、半導体デバイス製造会社に就職した女子学生でなければできない仕事であった。1 cm 角の基板に約 40 個の点電極を蒸着し、PS 上、Si 基板上、PS の境目上の C-V 特性、光照射による短絡電流を調べた。基板上に全面 SiO₂ 膜を成長させた場合、PS 上の SiO₂ 膜を除去した場合、PS 上にキノコ形電極を蒸着した場合についても同様の測定を行った。これらの結果を卒研生は北陸地区学生による研究発表会で報告した¹⁹⁾。減圧 CVD 法で SiO₂ 膜を成長させる場合には試料を 1000°C 以上の反応炉内に挿入する必要があったため、試料に変形やひずみが生じやすく、また、試料の一部のみに SiO₂ 膜を成長させることは困難であった。そこで SiO₂ ターゲット電極を購入し、減圧 CVD 法よりも膜質は劣るが、低温 (200°C 以下) で堆積できるスパッタ装置を使用して SiO₂ 膜を堆積させた。Ar ガス流量、加熱温度、スパッタ時間を変えて製作した MOS ダイオードの C-V 特性を測定した。高純度 Ar、O₂ および N₂ ガス (流量約 2 sccm) を安定して供給できるマスフローメータを購入し、同様の実験を行ってデータを蓄積した。これらの結果を電気関係学会北陸支部連合大会で発表した²⁰⁾。SiO₂ 膜をエッチング (etching) する工程があったため、エッチング溶液濃度、エッチング時間を変えて SiO₂ 膜を堆積し、C-V 特性測定を行った。

2004年度には既存のドラフトチャンバーに代えて、排ガス洗浄能力のあるスクラバ式ドラフトチャンバー (約 500 万円) が実験室に導入された。社会情勢を反映して、第 2 種有機溶剤、毒物及び劇物に対する管理が厳しくなり、厚生省および文部省 (当時) などからの通達により、全国高専、大学などで入れ替えが行われた。この装置の導入により、危険物取扱いの重荷が軽減された。既存の高価なドラフトチャンバー (約 100 万円) は他大学に引き取ってもらった。前年度までに集積したデータを参考にして、スパッタ装置で Si 基板上に SiO₂ 膜、ITO 電極を堆積させ、真空蒸着装置で Au、Al 電極を蒸着した。アニーリングを行い、基板と電極の密着性を高めた。SiO₂ 膜の膜厚判定を行い、ガラス基板上に ITO 膜を堆積させて光透過率測定を行った。四端針法を用いて ITO 膜の抵抗値測定を行った。SiO₂ 膜、ITO 膜の膜厚のスパッタ時間依存性、ITO 膜の光透過率および抵抗値の炉内温度依存性、酸素流量依存性、および、アニール温度依存性を調べた。3 種類の表面電極 ITO、Au、Al を堆積させて製作した試料の C-V 特性を測定した。SiO₂ 膜の直径を変えて表面電極を ITO または Au にした MOS 太陽電池に光照射して短絡電流、開放電圧を測定した。当実験室に設置された装置、測定機器で多くの実験ができるようになり、信頼できる実験データが得られるようにはなったが、四端針測定装置 (市価約 100 万円) は簡易に製作したものであったため、相対的な値を得られるに留まった。卒研生はこれらの大量のデータ集積結果を自信を持って電気関係学会北陸支部連合大会で発表した²¹⁾。光照射により基板と SiO₂ 膜の界面に蓄積された電荷を有効に取り出すためには SiO₂ 膜の形状を櫛型などにする必要があった。これまで行ってきた方法とは異なるフォトリソグラフィ法を用いれば希望する SiO₂ 膜の形状を基板上に堆積させることができ、細かいマスクパターンも堆積可能であった。本校実習工場でフォトリソ液を均一に塗布できるスピナー装置を製作した。減圧 CVD 法およびスパッタ法で基板上に SiO₂ 膜を堆積後、スピナー装置でフォトレジストを塗布し、フォトマスクを通して Ag ランプを照射することにより、円形または櫛型 SiO₂ 膜を基板上に堆積させた。フォトレジスト膜が剥がれたり、ピンホールができる事態が生じ、露光時間、エッチング方法の決定に時間を費やした。SiO₂ 膜上に Au 櫛型電極を蒸着して MOS 太陽電池を製作し、これらの試料に光照射して短絡電流を測定し、成膜時間と SiO₂ 膜形状の依存性を調べた。また、減圧 CVD 法とスパッタ法で SiO₂ 膜を堆積させたときの短絡電流の大きさの相違を調べた。これらの

結果を卒研究生は北陸地区学生による研究発表会で報告した²²⁾。また、陽極化成で p 形 Si 基板上に櫛型に変えた PS を形成し、フォトリソグラフィーで SiO₂ 膜の形状を変えて MOS 太陽電池を製作した。デモで来ていたナカデン (株) のマイクロスコープで櫛型 PS の表面写真観察を行った。基板表面を全面 SiO₂ 膜、Au 薄膜点電極とした試料および PS の光閉じ込め効果を調べるために化成時間を変化させて全面 SiO₂ 膜、全面 Au 薄膜電極とした試料の PS 上、Si 基板上、PS の境目上の C-V 特性測定、短絡電流測定を行った。また、フォトリソグラフィーで SiO₂ 膜の一部を除去した試料についても同様の測定を行った。

2005年度は前年に引き続き、フォトリソグラフィーで SiO₂ 膜の形状を変えて MOS ダイオードを製作した。SiO₂ 膜の形状加工は、本校メカトロ実習室早川技官に依頼して放電加工機 (FANUC Robocut α -1) で製作した幅 1 mm 間隔のステンレス製櫛形マスクを使用した。金属 (Al、Au) 重量を変えて基板上に真空蒸着装置で蒸着し、その膜厚を明治大学ハイテクリサーチセンターの α -STEP で測定した。このデータから蒸着金属重量から金属膜厚を求められるようになった。SiO₂ 膜厚のエッチング時間依存性を調べた。成膜時間、蒸着金属形状、蒸着金属重量および SiO₂ 膜の形状を変えた MOS ダイオードおよび MOS ショットキ構造の C-V 特性を測定した。これらの結果を卒研究生は北陸地区学生による研究発表会で報告した²³⁾。簡易で安全に実験できるように製作し直した陽極化成装置で櫛形 PS を形成し、フォトリソグラフィーで SiO₂ 膜の形状を変えて MOS 太陽電池を製作した。ステンレス製櫛形マスクを使用して明瞭な端部をもつ櫛形 PS を形成させた。PS の深さを明治大学ハイテクリサーチセンターの針式表面形状測定器 (DEKTAK6M) で測定した。製作した試料の PS 上、Si 基板上の C-V 特性測定を行った。また、減圧 CVD 法に比べて膜質の劣るスパッタ法で堆積させた SiO₂ 膜の膜質改善のために、混合ガス (Ar、O₂ ガス) 流量および流量比、スパッタ成膜時間、アニール時間、アニール温度を変えて n 形基板上に SiO₂ 膜を堆積させた MOS ダイオードの C-V 特性測定を行い、減圧 CVD 法によるデータと比較した。

2006年度には、陽極化成で p 形 Si 基板上に形成した PS にスパッタ法で SiO₂ または ITO 膜を成膜し、その上に点電極、櫛形または円形電極 Au、Al を蒸着した場合、SiO₂ 膜成膜を減圧 CVD 法で行った場合、SiO₂ 膜成膜後に陽極化成で PS を形成した場合の MOS 太陽電池、MOS ショットキ太陽電池の C-V 特性測定、短絡電流、開放電圧、光照射時の太陽電池の I-V 特性

(出力電流、出力電圧特性) を測定した。さらに、基板表面、断面の写真観察を行い、使用した各光源のスペクトル分布を分光光度計で測定した。MOS 太陽電池の変換効率に影響を及ぼす因子を多方面から調べた。PS、表面電極 (Al、Au および ITO)、SiO₂ 膜の各々について最適作製条件を求め、この条件で PS を形成した MOS ダイオード (スパッタ法および減圧 CVD 法で SiO₂ 膜成膜)、ショットキ太陽電池、MOS 太陽電池の試料を製作して測定を行った。基板裏面に蒸着した Al 電極のオーミック特性を調べるために明治大学ハイテクリサーチセンターの DLTS 測定装置で I-V 測定を行った。長岡技科大濱崎研究室の余川氏 (当実験室卒業生) に依頼して、SEM (KEYENCE VE-7800) とデジタルマイクロスコープ (HiROX KH-3000VD) による基板表面写真観を行った。これらの結果を立命館大学草津キャンパスで開催された応用物理学会全国大会で発表した²⁴⁾。久しぶりの大きな学会であった。テレビが何台も設置された 100 名以上の大学研究者、企業関係者などの見守る会場で堂々と発表した。京都の舞妓さん、祝賀会と発表した専攻科生にとっても、筆者にとっても忘れられない講演会であった。前年度に引き続き、フォトリソグラフィーで SiO₂ 膜の形状を変えて MOS 太陽電池を製作した。フォトリソを行う場合の問題であったレジスト膜剥がれの原因を調べた。光源と基板の距離、露光時間を変えて製作した試料を写真観察し、最適条件を得た。この条件で SiO₂ 膜の形状を櫛型にして MOS 太陽電池を製作し、I-V 特性を測定した。また、スヘリカルドリル法により、膜厚測定用ドリラーでレジスト膜の膜厚を測定した。レジスト液を均一な膜厚にするスピナーの回転数と回転時間、露光時間を変えてレジスト膜を堆積し、アルミナ懸濁液の粒子の大きさを変えて研削した試料の写真観察から膜厚を求めた。さらに、最近注目を集めるようになった色素増感太陽電池について光学的検証を行った。ナノクリスタル太陽電池キットを購入して製作した色素増感太陽電池に太陽光または白熱電球の光を照射し、短絡電流と開放電圧をデジタルマルチメータで測定した。

卒業研究最終年 (2007年度) は前年度までの追実験となった。減圧 CVD 装置で成長させた SiO₂ 膜の形状をフォトリソで加工して MOS ショットキ構造太陽電池を製作し、C-V 特性、光照射時の短絡電流、開放電圧を測定した。SiO₂ 膜形状を直径の異なる円形、櫛形、ショットキとした場合、成膜時間を変化させた場合、電極厚さを変えた場合の測定を行い、従来の結果と比較検討した。陽極化成法で p 形 Si 基板上に溶液濃度、

化成時間、電流密度を変えてPSを形成したMOS太陽電池のC-V特性、光照射時の短絡電流を測定した。また、スパッタ法でSiO₂膜およびITO透明電極を堆積させたMOS太陽電池、ショットキ太陽電池のC-V特性、光照射時の短絡電流、開放電圧を測定した。

5. MOS型太陽電池の製作

この10年間で得られた主要な実験結果を下記する。2001年までの結果は本誌ですでに報告した²⁵⁾が、再掲する。詳細については4節および本校図書館に納められている卒業論文を参照されたい。

5.1 実験装置、実験方法および実験条件

実験装置の一部を図1~6に、実験に使用したSi基板の物性値、ガスおよび電極材料の純度などを表1に、実験条件を表2に、実験方法を表3に示す。

5.2 実験結果のまとめ

MOS太陽電池の構造図の一部を図7に、実験結果のグラフの代表例を図8に、まとめを以下に略記する。

1. スチーム酸化では、1) 炉内の管軸方向中心近傍2cmの領域で最高温度となり、半径方向温度はほぼ一定であった。2) HF:HNO₃:CH₃COOH:pure-Water = 3:5:3:2、浸漬時間2分30秒で鏡面が得られた。3) 基板表面の自然酸化膜除去により良質なSiO₂膜を成長できた。

表1. 実験使用品目

Si 基板	導電形	n 形	p 形
	製造方法	CZ	CZ
	面方位	100	111
	直径(mm)	100	100, 150
反応ガス	O ₂ ガス純度	99.99%	99.999%
	Ar ガス純度	99.999%	
キャリアガス	N ₂ ガス純度	99.99%	99.999%
	Al 純度	99.999%	
電極材料	Au 純度	99.999%	
	ITO 純度	99.99%	
	SiO ₂ 純度	99.99%	
	酸化膜除去	HF, H ₂ O	
エッチング液	基礎エッチング	HF, HNO ₃ , CH ₃ COOH, H ₂ O	
	フォトリソ	OMR83	
フォトリソグラフィ	現像液	OMR83 現像液	
	リンス液	OMR83 リンス液	

表2. 実験条件

常圧 CVD	加熱温度	°C	750~1200
	加熱時間	min.	5~120
	O ₂ ガス流量	l / min.	0.5~5
減圧 CVD	N ₂ ガス流量	l / min.	0~5
	加熱温度	°C	700~1000
	加熱時間	min.	5~180
	炉内圧力	kPa	0.1~100
陽極化成	O ₂ ガス流量	l / min.	0.01~2
	N ₂ ガス流量	l / min.	0~5
	化成時間	min.	10~50
	電流密度	mA/cm ²	0.2~5.0
スパッタ	HF 濃度	%	20~50
	加熱温度	°C	RT~200
	SiO ₂ 膜成長スパッタ時間	min.	5~60
	ITO 膜成長スパッタ時間	min.	3~180
	高純度 Ar ガス流量	sccm	0.5~2
	高純度 O ₂ ガス流量	sccm	0.1~5
	高純度 N ₂ ガス流量	l / min.	0.1~5
	炉内圧力	Pa	2
RF 電源	W	100	
フォトリソグラフィ	スピナー回転数	rpm	4000
熱処理	アニール温度	°C	400~410
	アニール時間	min	0~10
光照射	放射照度	[W/m ²]	0~120
基板表面処理	酸化膜除去	HF, H ₂ O	1:20

表3. 実験方法

年度	卒研テーマ	実験方法、対象	Si 基板 導電形	実験内容	表面電極	電極形状	測定内容
1998	酸化膜成長	スチーム酸化	n	エッチング、SiO ₂ 膜堆積	—	—	炉内温度分布、顕微鏡写真観察、C-V
	理想 C-V 曲線	MOS ダイオード	n	数値計算(C言語)	—	—	C-V
1999	酸化膜成長	スチーム酸化	n	エッチング、SiO ₂ 膜成長	—	—	顕微鏡写真観察
	PS 形成	常圧 CVD	n	SiO ₂ 膜成長	—	—	C-V、膜厚
2000	MOS ダイオード	常圧 CVD	n	PS 形成	—	—	顕微鏡写真観察
	MOS ダイオード	減圧 CVD	n	SiO ₂ 膜成長	Au	点	C-V 測定
	PS 形成	陽極化成	n	PS 形成	Al	全面	炉内温度分布、炉内ガス流れの写真観察、C-V 電流密度、顕微鏡写真観察
2001	MOS 太陽電池	常圧 CVD	n, p	SiO ₂ 膜成長	Au, ITO	点、全面	膜厚、C-V、短絡電流、開放電圧、分光感度
	MOS ダイオード	減圧 CVD	n	SiO ₂ 膜成長	Au	点	C-V
	理想 C-V 曲線	MOS ダイオード	p	数値計算(C言語)	—	—	C-V
	介護用車椅子	歯車駆動車	—	試作	—	—	出力軸回転数
2002	MOS 太陽電池	減圧 CVD、スパッタ	n	SiO ₂ 、ITO 膜堆積	Au 薄膜、ITO	点、楕形、全面	炉内温度分布、炉内ガス流れの写真観察、光透過率 C-V、I-V、抵抗率、短絡電流、開放電圧、分光感度
	MOS 太陽電池	陽極化成	p	PS 形成	Al-Au 薄膜	点、全面	電流密度、顕微鏡写真観察、短絡電流
	MOS ダイオード	常圧 CVD	n	SiO ₂ 膜成長	Au	点	C-V
	介護用車椅子	油圧駆動車	—	試作	—	—	駆動速度
2003	MOS 太陽電池	減圧 CVD、陽極化成	p	SiO ₂ 膜成長、エッチング	Al, Au	点、楕、キノコ	C-V、短絡電流
	MOS ダイオード	スパッタ	n	SiO ₂ 膜堆積	Au	点	C-V
	MOS ダイオード	ウェットエッチング	n	SiO ₂ 膜成長	Au	—	膜厚
2004	MOS 太陽電池	スパッタ	n, p (ガラス)	SiO ₂ 、ITO 膜堆積	Al, Au ITO	点、円、全面	光透過率、抵抗率、C-V、膜厚 短絡電流、開放電圧
	MOS 太陽電池	減圧 CVD、スパッタ フォトリソグラフィ	n	SiO ₂ 膜成長	Au	楕形、円	短絡電流
2006	MOS 太陽電池	陽極化成、フォトリソ 減圧 CVD	p	SiO ₂ 膜成長、PS 形成	Au 薄膜	点、楕形、全面	短絡電流、C-V、顕微鏡写真観察
	MOS ダイオード	減圧 CVD、スパッタ	p	SiO ₂ 膜堆積	Au	点	膜厚、C-V
	MOS ショットキ太陽電池	減圧 CVD、フォトリソ	p	SiO ₂ 膜成長	Au	点、全面、円、楕	C-V、短絡電流
2007	MOS 太陽電池	陽極化成、スパッタ フォトリソグラフィ	p	SiO ₂ 膜堆積 PS 形成	Au	楕形、点	エッチング深さ、C-V
	MOS 太陽電池	陽極化成、スパッタ 減圧 CVD	p	SiO ₂ 膜成長、ITO 膜堆積	Al, Au	円、楕形、点	C-V、I-V、短絡電流、開放電圧、 分光感度、写真観察
	レジスト膜	フォトリソグラフィ	n	レジスト膜	—	—	写真観察、膜厚
2006	MOS 太陽電池	減圧 CVD	p	SiO ₂ 膜成長	Al, Au	楕形	膜厚、I-V
	有機太陽電池	色素増感太陽電池	(ガラス)	TiO ₂ 膜	—	全面	I-V、短絡電流、開放電圧
	MOS ショットキ太陽電池	減圧 CVD、フォトリソ	p	SiO ₂ 膜成長	Al	円、楕形	C-V、短絡電流、開放電圧
	MOS 太陽電池	陽極化成	p	SiO ₂ 膜成長	Al	点、全面	C-V、短絡電流
	MOS 太陽電池	減圧 CVD	p	SiO ₂ 膜成長	Al	全面	C-V、I-V、短絡電流、開放電圧
MOS ショットキ太陽電池	スパッタ	n, p	SiO ₂ 、ITO 膜堆積	ITO	全面	C-V、短絡電流、開放電圧	

2. 常圧 CVD では、1) 酸化膜成長の最低加熱温度は約710[°C]であった。2) Si 酸化膜の膜厚は加熱時間の増加、加熱温度の上昇とともに増加し、その後一定値となった。3) アニーリング時間が長いほど、MOS ダイオードの最大静電容量は小さくなった。4) 活性化エネルギーを計算した結果、試料の酸化は表面反応と拡散反応の両方に依存した。
3. 減圧 CVD では、1) 石英管入口から35~40[cm]の間で最高温度になったが、半径方向は上部と下部の差が約50~60[°C]あった。2) 石英管内ガス流れの観察より、石英管内に流入した気体は基板支持台の上を一様に通過していた。3) 酸素流量、加熱時間が増加するほど膜厚も増加したが、流量が0.2[l/min.]を超えると膜厚は一定になった。4) 減圧では常圧に比べて膜成長速度が遅かった。5) Au電極を蒸着し、酸化膜成長時の加熱温度900[°C]で開放電圧、短絡電流ともに値が大きくなった。6) 分光感度特性は Au電極直径 2 [mm]、炉内圧力10[kPa]、加熱温度900[°C]、加熱時間10[min]で市販の多結晶太陽電池の分光感度特性に最も近づいた。7) n形の場合750[°C]では20分間、p形では30分間加熱した試料の短絡電流が最も高くなった。
4. 陽極化成では、1) n形基板ではショットキ障壁が大きく、ほとんど通電しなかったが、p形基板では1 [V]以下で陽極化成が行えた。2) HF濃度30[%]、電流密度50[mA/cm²]、化成時間20[min.]のときに最大短絡電流1508[μA]が流れた。3) Si基板上よりPS上で多くの電荷を蓄えられた。4) MOSショットキ構造でより大きい短絡電流が得られた。5) PS上では最大23[mA/cm²]の比較的大きな短絡電流を得、変換効率η=9.3%であった。6) 基板表面電極の最適作成条件はAu(120Å)+Al(300Å)、形状は楕円形(0.38cm²)であった。7) SiO₂膜成膜の最適作成条件はスパッタ時間1 [min.]、熱処理温度350[°C]、熱処理時間1 [min.]であった。8) 陽極化成の最適作成条件は化成時間10[min.]電流密度20[mA/cm²]、溶液濃度HF:C₂H₅OH=1:4であった。9) 陽極化成を行うと短絡電流が大きくなり、開放電圧は小さくなった。10) PS表面が規則正しくエッチングされているとき大きな短絡電流を得た。11) ショットキ太陽電池では点電極(直径1 mm)での最大短絡電流は35[mA/cm²]、開放電圧は0.482[V]であった。12) MOS型ではショットキ型に比べて短絡電流は増加したが、開放電圧は減少した。
5. スパッタ法では、1) 炉内温度を上げ、アニールを行うことにより、ITO膜の抵抗率を下げるこ

でき、大きな静電容量を得ることができた。2) 表面電極 Au、酸化膜直径φ6で一番大きな短絡電流4.2[mA/cm²]を得ることができた。3) ITO膜は加熱温度が高くなるほど光の透過度が高くなり、スパッタ時間10[min.]で光の透過度は約83.5%だった。

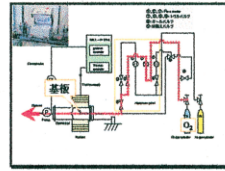


図1. 減圧 CVD 装置

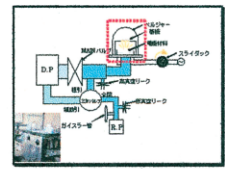


図2. 真空蒸着装置

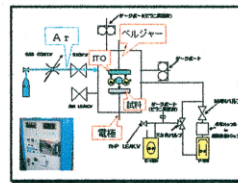


図3. スパッタ装置

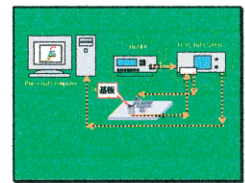


図4. C-V 測定装置

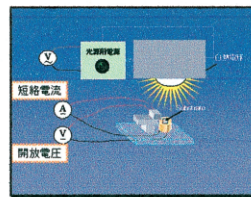


図5. 光照射装置

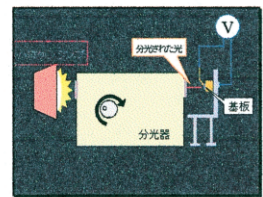
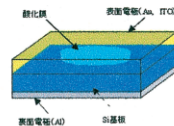
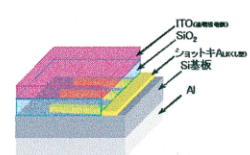


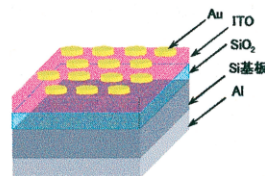
図6. 分光感度測定装置



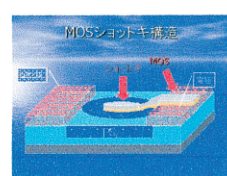
(a)



(b)



(c)



(d)

図7. 種々のMOS構造

表4に年度毎に進展したMOS太陽電池の最大短絡電流と最大開放電圧を示す。最大短絡電流は市販の太陽電池(約30~40[mA/cm²])に近づいたが、最大開放電圧はまだ値が低かった(市販の太陽電池では約0.5~0.6[V])。本研究で得られた最大変換効率は9.3%であり、今一步まで近づいた。更なる研究が期待される。

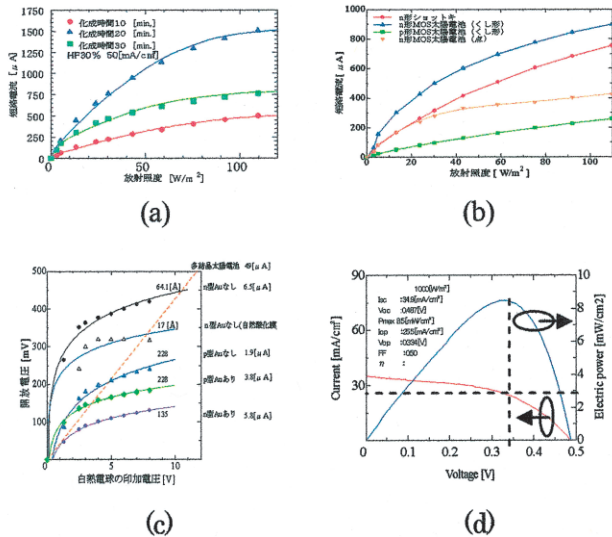


図8. 電流、電圧特性

表4. MOS 太陽電池の短絡電流と開放電圧

年度	最大短絡電流 ($\mu A/cm^2$)	最大開放電圧 (mV)	実験方法
2001	49	420	常圧 CVD
2002	900	—	減圧 CVD、スパッタ
	1508	—	陽極化成
2003	883	—	陽極化成、減圧 CVD
	4200	—	スパッタ
2004	400	—	フォトリソ、減圧 CVD、スパッタ
	4000	—	陽極化成、減圧 CVD
2005	480	—	フォトリソ、減圧 CVD
2006	39000	487	陽極化成、スパッタ
	960	344	フォトリソ、減圧 CVD

6. 卒業研究の教育目標

卒研生には卒業論文枚数70ページ以上を課した。毎年の卒論すべてを実験室の本棚に並べた。PCにそれまでの卒研のデータすべてを保存させ、新規卒研生達が自由に閲読できるようにした。MOS 太陽電池の製作についての卒業研究を毎年課しており、卒研生たちは大いに参考にした。4月から実験を開始した。就職活動は、担任をしていたときに4年生の12月から就職先を探させたが、そのとき以外は学生の自由意志に任せた。就職率100%であり、本学科は就職指導が確立されていた。卒研生たちは実験と就職活動や受験勉強を両立していた。一つの試料作製に連続10時間近くを要し、夜遅くまで実験していた。時間割内では実験が終わらなかった。卒研生たちは授業開始前の朝8時ごろに来てスイッチを入れていた。1つだけの作業を行うのではなく、測定をしながら他の実験を行うという忙しさであった。実験は待ち時間が多く、十分に対応できた。虫が出ないように修理した筆者の官舎に卒研生たちは毎年のように遊びに来た。コミュニケーションが取れ、卒研生たちのやる気を起こさせる良い機会となった。卒研生達はやる気になれば信じられない程の力を発揮した。「これでいいんじゃないの」と言っても納得しなかった。それが良い結果に結び付かなくても

最大限の努力を払っていた。彼らの要求を満足させるために筆者も大いに努力したが、学生たちの質問に対して2~3年後によく答えを見出す場合もあった。赴任後の2年間を除き、専攻科3年間を含めて8年間連続で担任をし、ソフトボール同好会顧問をしたが、それ以外の雑務に追われることなく、MOS 太陽電池の製作に時間を費やすことができた。研究費不足のため10年間で購入したPCは一台のみで、ソフトも購入できなかった。高額を要求したこと、実験対象に魅力が感じられなかったこと、光変換効率が低いこと、良い実験結果が得られなかったことなどにより科研費を得られなかった。どうなるか判らない基礎研究に国は金を交付せず、応用研究、若手研究に交付した。実験は苦勞の連続であったが、5年間で一つの成果を挙げなければならぬ時代に10年かけても MOS 太陽電池を世に出すことはできなかった。夢のようなテーマに挑戦したが、卒研生に開発、研究の楽しさ、厳しさ、最先端の高度な基礎知識を伝えることができたのは良かったと考えている。当実験室卒業生で半導体関連会社に就職した学生は「真空蒸着装置を動かしている。卒研でやっておいて良かった」と言っていた。数名の卒研生が大学編入して半導体関連の研究室に入った。実験装置の不足などで高専でのレベルは低かったが、基本的実験内容や手段が大学と大きく変わっていないことに驚いていた。高専での経験を生かすことができ、彼らは自信を持って卒業研究に取り組んでいるようであった。高専再編成によって多くの優秀な学生が入学してくると予想されるが、数学や物理学が教養の基礎であるように、研究の基礎も十分に教育されなければならない。現在最先端の高度な技術にも触れさせる必要がある。それには卒研が適している。卒研は5年間の集大成であると折に触れて言われている。高レベルの卒研を行うことによって卒研生の意欲は高まる。卒研をやったという実績が残るのみでは物足りない。

卒研での最大の問題は引継ぎであった。卒研室に来るのは5年生のみで、実験を毎年一から出直さなければならなかった。大学のように大学院生がいれば実験も捗る。本校では専攻科生を多く持てば、何とかなる。筆者のように継続的に実験を行う場合には専攻科生が必要であった。専攻科の定員を増やし、専攻科を充実すべきである。卒研生および専攻科生が長期間使用できる大型実験装置を導入することはできないであろうか。地元大手企業にインターンシップを通じて世話になるだけでなく、企業の大型機器を学生に使用させる手もある。単なる人材交流ではなく、研究、開発の人材交流も必要である。大型測定装置は富山県工業技術

センター、長岡技科大分析計測センターなどでも借りられたが、綿密な将来計画を必要とした。地域連携を図る地域共同テクノセンターを設置し、専任の教職員を置けば(教員会議資料)、また、高専各ブロックごとに一つの大型研究センターを設置することができれば、学生は自由に高度な研究、開発ができる。

高専は現在転換期にある。本校は専攻科が設置され、JABEE 認定を受け、今年10月に富山工業高専と統合するが、これで安泰となるわけではない。高専機構の方針に従って、横断的、境界領域的な立場から多面的に物事を考える手法や考え方を学ばせることが必要になってきており¹⁾、教員は地域連携、国際化などの学外的業務に振り回されている。学生達も忙しい学園生活を強いられている。しかし、高専機構や JABEE の方向ばかりを追求しては本当の研究・開発者は育たない。教員と学生が対話する時間が制限されている。学生が余裕を持ち、もっと腰を落ち着けて知識を探求する環境を構築すべきではないか。教員は学生に高度な専門基礎知識を十分に習得させる必要がある。

当実験室の卒研生たちは一生懸命に頑張った。毎年のように入室してきた優秀でやる気のある男子学生や真面目で器用な数名の女子学生たちの実験への真剣な取り組みが実験データを好結果へと導き、MOS 太陽電池の光変換効率を議論できるまでになった。各自の卒業論文を全卒研生に渡したが、手に置いているであろうか。卒業研究を行った当時の苦労を思い起こし、現職場でも頑張りたいと思う。

筆者は現場に身を置く立場にあるが、本稿では第三者的立場から推敲を重ねた結果の発言となった。筆者の文面に不快を感じられた諸先生方もお出でかと思われるが、本校の発展にいささかでも寄与することができればと考えての投稿であることをご理解頂きたい。卒業研究その他でお世話になった大学、高専の諸先生方、本校の技官、卒業研究生たちにお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 富山商船高等専門学校要覧 (2008), P.1.
- 2) 国立高専だより3(2007), P.1.
- 3) 明治大学広報603 (2009), P.1.
- 4) 末松; 応用物理77-12 (2008), P.1479.
- 5) 西原; 富山商船高専研究収録34 (2001), P.31.
- 6) 加藤, 水野; 日本機械学会論文集 (B 編) 48-432 (1982), P.1474.
- 7) H.Kato and Y.Mizuno; Bulletin of the JSME 26-214 (1984), P.369.

- 8) 植草、水野、村松; 明治大学科学技術研究所紀要28- 3 (1989), P.27.
- 9) S.Uekusa and Y.Mizono; Recent Research Development, Crystal Growth research, 1(1991), P.175.
- 10) 植草、水野; 明治大学科学技術研究所紀要29-3 (1991), P.15.
- 11) Y.Mizono and S.Uekusa; Proc. 3rd Int. Symp. Electrochem. Soc. (1993), P.369.
- 12) S.Uekusa and Y.Mizono; Jpn. J. Appl. Phys. 33-1-5A (1994), P.2679.
- 13) 水野, 植草; 富士通計算科学研究センターニュース 5 (1995), P.5.
- 14) Y.Mizono and S.Uekusa; J. Crystal Growth70 (1997), P.61.
- 15) Y.Mizono and S.Uekusa; Microelectro. Eng. J. 43 (1998), P.519.
- 16) 丹波, 中江, 水野; 電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 D-17 (2001), P.254.
- 17) 余川, 西川, 水野; 電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 D-5(2002), P.190.
- 18) 大坂, 西川, 余川, 水野; 北陸地区学生による研究発表会講演論文集 D-12 (2003), P.50.
- 19) 藤野, 杉本, 水野; 北陸地区学生による研究発表会講演論文集 D-8(2004), P.47
- 20) 尾谷, 磯部, 水野; 電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 D-27 (2003), P.196.
- 21) 林, 藤野, 堀川, 森, 山元, 水野; 電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集 D-24 (2004), P.196.
- 22) 山元, 森, 堀川, 林, 藤野, 水野; 北陸地区学生による研究発表会講演論文集 D-2(2005), P.62.
- 23) 木村, 吉田, 水野; 北陸地区学生による研究発表会講演論文集 D-21 (2006), P.79.
- 24) 油谷, 水野; 第67回応用物理学会学術講演会 ZQ-12 (2006), P.29.
- 25) 水野; 富山商船高専研究収録34 (2001), P.19.