クリーンルームを用いた学部学生のための デバイス製作実習教育

An Advanced Education Program for Semiconductor Device Technology Using Clean-Room Facilities

矢野 満 明^{※1}
Mitsuaki YANO

佐々 誠 彦^{※1}
Shigehiko SASA

井上 正 崇^{※1}
Masataka INOUE

Advances in our engineering lab-course particularly designed for educating semiconductor technology utilizing the clean-room facilities in Osaka Institute of Technology are described. The facilities in “New Materials Research Center”, were founded in 1987 with the aid of financial support to private institutions from MEXT, and have been devoted not only for the research on the physics and device applications of new materials but for the unique and practical education program for undergraduate students. It was found that many of the students were satisfied with the education program. We also report an extensive project of our lab-course which widely covers the trainings from material characterization to device fabrication techniques together with the lectures.

Keywords : Engineering Lab-Course, Faculty of Engineering, Educational Experiments for Students, Device Fabrication Technology, Questionnaire Survey

キーワード：工学教育，工学部，実験，物作り，教育効果

1. はじめに

昭和24年に開設された大阪工業大学は大正11年設立の「関西工学専修学校」に端を発し、関西地区では有数の歴史と伝統を持つ工学系の私立高等教育機関である。歴史の最も古い工学部には、都市デザイン工学科、建築学科、電気電子システム工学科、機械工学科、応用化学科、電子情報通信工学科、経営工学科の7学科が設置されている。また、平成18年度からは環境工学科、空間デザイン学科、生体医工学科の3学科が増設され、技術マネジメント学科と名称変更する経営工学科と併せて10学科を擁することになる。この他、大阪工業大学には情報科学部と知的財産学部も設置され、大学院の工学研究科、情報科学研究科、知的財産学研究科（専門職大学院）とともに、工学関連分野の幅広い教育と研究を行っている。

このような学部構成のもと、本学工学部の目指すところは「産業界に役立つ工業技術者の育成」であり、各学科それぞれの領域で「物作りのための人作り」を主眼とした教育プログラムを展開している。その一環として、電気電子システム工学科と電子情報通信工学科は、クリーンルームを使った半導体デバイス関連の実験実習教育を17年間の長きに亘って実施してきた。本稿では当該教育プログラムの概要を紹介し、成果の

集約と今後の更なる改良について展望を述べる。

2. 背景と目的

エネルギー・システムからエレクトロニクスや情報・通信まで、現代社会の根幹を支える電気電子工学分野は守備範囲を急速に拡大している。これに伴い、学部学生が学ぶ内容は「電磁気学」、「電気回路」、「電子回路」を主体とした数十年前のカリキュラムと比較して大幅に増加した。今や「コンピューター」、「半導体」、「シリコンテクノロジー」、「情報ネットワーク」等に係る知識は不可欠なものとなっている。その一方で、大学進学率の増加に伴って学生の能力と指向が多様化している。これに対処するため、大学における授業では、最新の科学・技術の成果をできるだけ平易に説明し、かつ、それぞれの科目間の繋がりを明確にする等の工夫がなされている。

しかし、技術の急速な進展に伴うハイテク機器のブラックボックス化によって、現在学んでいる学科目と実際の技術の関係が解りにくくなっていることも事実である。特に、技術革新の速いエレクトロニクス分野では、高等学校までの授業内容はもちろん、大学における授業でも、基礎科目は先端機器の理解に直結していないことが多い。

このような背景から、基礎科目を学ぶ学部低学年次生の学習意欲が低下し、3年次後期になっても自分のやりたいことが見つからない学生も存在する。この間

平成18年1月31日受付

※1大阪工業大学工学部

題の解決には「興味を引き出す教育」が必要であるが、工学部にあつては特に「物作り」を通じての興味喚起が重要である。

「物作り」を通じての興味喚起にとって、講義科目と実際の技術を繋ぐ実験実習科目は極めて重要である。このため多くの工夫が加えられ、従来は与えられた回路やシステムの特性測定が主流だった実験実習内容も、実際に各学生が回路やシステムを自作して特性を評価する方式に改められている。例えば、筆者らの所属する電気・電子系2学科とも、2年次および3年次前期と後期に通算4セメスターの実験実習科目を開講しているが、その内の1セメスター（半期間、前期あるいは後期）を各自が半田付けで電子回路を組み立てる内容に改編し現在に至っている^{1), 2)}。

しかし、エレクトロニクス分野の重要デバイスである集積回路や受発光デバイスは、その製作プロセスが複雑で特殊な大型機器やクリーンな環境を必要とするため、市販の完成品を回路部品として使用するに止まっていた。このため、講義科目で学ぶ半導体物理や半導体デバイス工学、集積回路工学等について、実際の製作プロセスに直結する実験実習が不十分であった。

このような状態を改善するため筆者らは、昭和62年に「新材料研究センター」を中心として材料・デバイス系ハイテク教育のプログラム開発に着手した。同研究センターは材料・デバイス分野の研究と教育を目的として本学に設立された学科横断研究施設で、昭和61年度の私立学校施設整備費補助金を受けて購入した大型機器が約350m²のクリーンルームに備えられている。

当時、研究目的で同程度以上の施設を持つ大学は多かったが、学部レベルの組織的教育に利用されている例はほとんど無かった。筆者らは、「物作り」の面白さと重要さに目覚めさせることを狙って、電気電子系学生全員の履修を前提として、エレクトロニクス材料・デバイスを製作する実験実習課題を開発した。

3. 教育プログラムの開発と実施

昭和62年時点の本学には、所謂昼間の学生を対象としたⅠ部工学部と、夜間の学生を対象としたⅡ部工学部が設置され、電気工学科（現：電気電子システム工学科）と電子工学科（現：電子情報通信工学科）の学生定員は、両学科とも一学年あたりⅠ部110名、Ⅱ部110名であった。多数の学生全員を対象に実験実習を少人数単位で教育するために、既存の実験実習科目（2年次と3年次の必修科目で、電気工学科：電気工学実験、電子工学科：電子工学実験）の実験課題を改編して、その一部を新材料研究センターで実施することとした。

電気工学実験と電子工学実験は毎週1日で、連続3コマ（1コマ90分）の授業であった（カリキュラム

の改変により現在は連続2コマになっている）。受講学生を1班あたり5名に班編成し、同時に2班（場合によっては3班）が同一課題を実験実習する授業形態とした。1セメスターあたり9から10テーマの実験実習課題が準備され、各班はサイクリックにこれらの課題を実験・実習して毎回の報告書を作成する。

このような条件下で、2年次あるいは3年次までに学ぶ講義科目との連続性や整合性を考慮して、新材料研究センターで実施する実験実習課題として、次の7課題を開発した。

（1）金属蒸着膜の作製と特性評価

真空蒸着法でシャドーマスクを通じて金属（銅）薄膜をガラス基板上へ作製し、膜厚と蒸着時の坩堝と基板の幾何学的配置の関係、膜厚と電気抵抗の関係を調べる（キーワード：真空蒸着、触針式精密段差計、余弦法則、四端子抵抗測定）。

（2）半導体材料の電気特性測定

温度特性が顕著に観察できる高純度ガリウム砒素エピタキシャル層をフォトリソグラフィと組み合わせたウエットエッチングでホールブリッジに加工し、極低温から室温までの抵抗率ならびにキャリア密度と移動度の温度依存性を調べる（キーワード：ホール測定、キャリア密度、移動度、イオン散乱、格子散乱、活性化エネルギー）。

（3）ショットキーダイオードの作製と測定

ガリウム砒素エピタキシャル層表面にシャドーマスクを用いて金属（金）薄膜電極を真空蒸着したショットキーダイオードを作製し、整流特性（ I - V 特性）とバイアスに依存した静電容量特性（ C - V 特性）を測定する（キーワード：ショットキー接合、 I - V 特性、 C - V 特性、整流特性、不純物密度）。

（4）太陽電池の作製と測定

n 型シリコン基板上にシャドーマスクを用いて大面積金属（金）薄膜電極を真空蒸着したショットキー接合太陽電池を作製し、整流特性（ I - V 特性）ならびに光起電力特性（ I - L 特性）と光起電力のスペクトル応答を測定する（キーワード：ショットキー接合、光起電力、 I - V 測定、 I - L 測定、スペクトル応答）。

（5）HEMTの製作と測定

アルミニウムガリウム砒素／ガリウム砒素のヘテロ接合エピタキシャル層をフォトリソグラフィ法で加工して高電子移動度トランジスター（HEMT）を作製し、その静特性（ I_{DS} - V_{DS} 、 I_{DS} - V_{GS} ）を測定する（キーワード：HEMT、変調ドーピング、電界効果トランジスター、トランジスターの静特性）。

（6）EL表示デバイスの作製と測定

透明電極つきポリエチレンテレフタレートフィルム基板上へ高誘電率有機バインダーに分散した硫化亜鉛系微粒子層とカーボン系導電層を順次スクリーン印刷してエレクトロルミネセンス（EL）表示デバイスを

作製し、交流駆動の電圧と輝度、周波数と輝度の関係を測定する（キーワード：EL発光、発光原理、周波数特性）。

（7）SAWデバイスの作製と弾性波信号の測定

ニオブ酸リチウムの単結晶板上に真空蒸着した金属（アルミニウム）薄膜をフォトリソグラフィ法で櫛形電極に加工して表面弾性波（SAW）素子を作製し、高周波信号の伝送特性（周波数特性と信号遅延時間特性）を測定する（キーワード：SAWデバイス、表面弾性波、圧電性、フィルター、遅延）。

いずれの課題も試料の作製と測定の両方を含んでいる。課題（1）、（2）は2年次向きで、（3）以降は3年次向きである。また、課題によっては1回3コマの時間内で終了することが難しく、製作プロセスと測定を分けて2週連続して同一課題を実施する、製作プロセスの一部を予め済ました試料を準備する、一部の項目の実施を省略する、等の工夫が必要である。これらの課題は筆者らと当時の大学院生が協力して開発し、卒業研究の4年次生を仮対象とした模擬授業でテストした。

すべての課題を模擬授業の結果を踏まえた手直しまで含めて完成するには、昭和62年度から平成元年度までの3ヵ年を要した。ただし、昭和63年度からテストの終わった課題を逐次投入し、電子工学科2年次生を対象とする「電子工学実験Ⅰ」の1課題分と、電気工学科3年次生を対象とする「電気工学実験Ⅲ」の3課題分の学部学生教育を開始した。実施にあたっては、各課題に担当教員1名と博士前期課程大学院生のティーチングアシスタント（TA）1名を配当し、少人数教育の実を上げることと安全の確保に留意した。

この新しい教育プログラム「新材料・素子開発教育」は文部省（現：文部科学省）の「特色ある私学教育」と認定され、昭和62年度の開発当初から平成2年度

まで、通常の期間3年を1年超えた4年間の経常経費補助金を受けた。

当該教育プログラムは受講者全員から毎回の受講後に無記名アンケートをとった。また、TAを担当した大学院生からもアンケートをとって授業方法の改善に役立てた。図1は当時の受講学生（電子工学科）の「金属蒸着膜の作製と特性評価」に関する感想を尋ねたアンケートの回答分布である³⁾。クリーンルームという特殊な環境での実験実習のため「息苦しい」、「クリーンウェアを着るのが面倒」といった回答もあったが、大半の受講生が興味をもって受講したことが判る。

大学院生のアンケート結果からは、課題の意図を理解してTAを担当することが、彼ら自身の材料・デバイス分野全般に関する知識を深めることが判った。これは、授業実施に必要な試料の準備（例えばガリウム砒素エピタキシャル層を分子線エピタキシー法で作製）も課題担当のTAに協力してもらったためである。

これらの回答結果から、当該教育プログラムが「物作り」に対する興味を喚起する上で役立つと判断し、平成3年度以降も引き続き実施することとなった。

4. TA制度の活用と教育プログラムの改善

新材料研究センターでは、平成2年度の私立学校施設整備補助金を受けて、半導体・超伝導複合デバイス作製に係る大型研究機器を導入した。その結果、教員や大学院生の研究が進展したことは勿論であるが、研究用途の使用に限定されていた既存の研究装置に若干の時間的余裕が得られることとなった。

そこで、今度は、学部生と博士前期課程大学院生の垂直統合を狙って、TAを担当する大学院生の役割を大幅に拡大して教育プログラムを見直した。即ち、TAは単に教員の指導を補佐するのみならず、自分たちが行った試料の準備プロセスや、使用した大型装置の説明も担当することとした。基礎的な課題で、準備にそれほど大型装置を使用しない場合には、自分が研究で使用している大型研究装置の前で、研究の目的や方法とともに当該装置の説明をさせた。説明の持ち

図1 「金属蒸着膜の作製と特性評価」に関する感想の分布

図2 TAとともに実験実習に取り組む学生の様子ー遠景

図3 TAとともに実験実習に取り組む学生の様子－近景

時間を10分程度とし、そのスタイルや方法については各自に一任した。

この結果、説明用ポスターを作る、原理を説明するための簡単な模型を作る、試料作製のプロセスごとのサンプルを展示する等の、各自が工夫を凝らしたさまざまな方法で説明が行われた。図2、3は、TAとともに実験実習に取り組む学生の授業風景である。

アンケートに記された受講生の評判は非常に良く「研究が身近に感じられた」、「自分も大学院に進学したい」、「入学後初めて大学らしい授業を受けた」等感想が多くなった。一方、TAを務めた大学院生からは「プレゼンテーション力がついた」、「自分の研究を引き継いでもらう後輩獲得のチャンスと思い熱が入った」、「授業を任されて自信がついた」等の感想を得た。

この垂直統合型少人数教育「新材料とデバイス開発に関する先端科学技術教育」は、「物作り」の面白さに目覚めた先輩を学部生が身近な存在として捉える格好の機会でもあった。このことが文部省にユニークであると認定され、「特色ある私学教育」として平成6年度から平成8年度の3年間、経常経費補助金を受けることができた。

その後、平成13年度のカリキュラム改定で学生実験が3コマ連続から2コマ連続に変更され、これに伴って当該教育プログラムで実施する実験実習課題の内容も若干の修正を行った。また、受講生のレベルの多様化もさらに進行し、当初準備した課題の一部は、時間的・レベル的に、学年全員の履修を前提とする必修科目での実施が困難になった。しかし、当該教育プログラム自体は基本的に同一スタイルで継続されて現在に至っている。

この間に、当該教育プログラムを受講した電気電子系学生は延べ6,500人を超え、TAを担当した大学院生も延べ80人を超えた。正確に調査したわけではないが、これだけ多くの学生がクリーンルームを体験し、通常の学生実験室では実施が困難なエレクトロニクス材料・デバイスの製作実習を、正規の必修科目として

履修した長期間に互る実績は、全国的にも珍しいのではないかと考えている。

5. 受講生の反応と講義科目との接続

この教育プログラムを受講した学生の反応を、無記名アンケートで調査した結果を述べる。前述のように実験実習内容に関するアンケート調査は毎年行っているが、現在の学生についても、図1に示した以前の学生の反応と大差は無い。ここでは紙数の都合もあり、平成16年度末に実施した、他の講義科目との繋がりや「物作り」に対する興味の喚起に関する総合的なアンケートの調査結果の一部を紹介する。

良かった点

- それまで漠然としていた半導体エレクトロニクスに具体的な興味が湧いた。
- 工程別にLSIの製造プロセスを見ることができたので講義の理解が楽だった。
- 先輩のTAに研究や就職のことを聞けて役に立った。

悪かった点

- 実験実習と講義に時間差があるので忘れてしまう。
- 細かな作業の多いエレクトロニクス系の授業がさらに嫌いになった

図4 実験実習を受けた効果に関するアンケートの回答分布と自由意見欄記載のコメント例。受講直後の3年次生と、時間が経過した4年次生ならびに大学院生からの回答

調査対象は電気電子システム工学科の昼間部3年次生と4年次生で、この前節で述べた課題(2)半導体材料の電気特性測定、(3)ショットキーダイオードの作製と測定、(5)HEMTの製作と測定、の3課題を、2コマ化に対応した簡略版で、4週間連続計8コマの実験実習として、3年次の後期に受講している⁴⁾。

このアンケートで本教育プログラムとの関連性を尋ねた講義科目は、学部3年次配当の「半導体エレクトロニクス」と4年次配当の「LSI工学」である。電気電子システム工学科では、材料・デバイス系科目の基礎となる電磁気学や電気回路、電子回路は学部2年次までに履修しており、直接関連する講義科目も学部2年次の「電子デバイス工学」に引き続いて学部3年次の「電子物性論」および上述の科目へと続いて学ぶことになっている⁵⁾。また、比較のために、この教育プログラムを学部3年次に開講し、その後、本学大学院電気電子工学専攻に進学して博士前期課程に在学の、光・エレクトロニクス系に所属する大学院生にも同一のアンケート調査を実施した。

図4はアンケート結果の要約である。関連講義科目の受講に際し、本教育プログラムが「半導体分野のイメージを得ることに役立った」、「理解に役立った」と回答した割合は、いずれも学部3年次生で98%以上、4年次生で85%以上に達した。「物作りに興味が湧いた」と回答した割合もほぼ同じであった。4年次生で若干「あまり役に立たなかった」と回答した割合が増えたのは、自由意見欄記載のコメント例に見られるように、受講後の時間経過とともに記憶が薄くなることも理由の一つであろう。大学院生においても同様な傾向にあった。また、この教育プログラムの受講がきっかけで材料・デバイス系に興味を持ち、大学院進学に繋がったとの回答も多かった。

以上の結果から、「物作りの面白さ・重要さに目覚めさせるとともに材料・デバイス系講義科目の理解を助ける」という、所期の目的は果たされたと判断できる。また、「卒業研究テーマを材料・デバイス系に選択するときの決め手になった」、「進路を決定するのに役立った」とする意見が多かったことは、本教育プログラムの開発・担当者として嬉しい限りである。熱心に工夫を凝らしてくれたTA諸君に感謝したい。

6. 今後の課題と展望

本教育プログラムは、課題の開発から19年、実施開始後18年を経た。この間に、少子化と理科離れの進行のためさらに学生の基礎学力の多様化が顕著になった。また、インターネットの普及とともにハイテクの既視感覚化が進み、新しい体験に対する感受性の乏しい学生が増加しているように思われる。大学院への進学率も上昇したが、その能力や目的意識は多様化している。

一方社会情勢に目を転ずると、世界の工場としての中国が台頭し、日本の工業は、従来の高品質で高性能な製品を大量に低コストで生産する体制から、高付加価値製品を個々の要求に沿ってタイムリーに供給する体制へと変化しつつある。また、「京都議定書」に代表される地球環境保全の重要性と、限りある資源の有効かつ循環的利用の観点から、環境と省資源・省エネルギーに配慮した生産方式への転換が進んでいる。さらに急速な人口比率の高齢化や情報・人・金・物のボーダーレス化によって社会構造自体の変革も求められており、社会資産の一つである工学技術においてもこれに対応したパラダイムシフトが必要となっている。

このような課題は先進国に共通した内容を含み、日本が今後とも工業分野で世界先端の一角を占めてゆくためには、新しい価値観に立脚した工学技術の確立が急務である。

本学はこのようなパラダイムシフトを見据えて、研究と教育の統一目標に「人間中心の社会を構築するための工学技術」を掲げ、若い世代がイキイキと、熟年世代も安心して暮らす社会の実現へ寄与することを目指している。これに対応する工学部・工学研究科の使命は「健康・安全・安心」を支える工学技術の研究と教育であり、その基礎となる学部教育において、21世紀の「産業界に役立つ工業技術者の育成」を達成するために本論文の冒頭に記した組織変更を行った。

研究面では、「バイオペンチャーセンター」、「環境ソリューションセンター」、「医工学研究センター」を設立し、学内の人的、資金的な資源の集中的な投下を図っている。新材料研究センターにおいても、「人に優しい機能集積ナノ材料の創製とマイクロデバイス応用(Nanotechnology for the Next Generation)」に焦点を合わせ、工学研究科の各専攻を横断的に連携する「ナノ材料マイクロデバイス研究センター」へ発展的に改組することを検討している。

このような変化に対応して、本教育プログラムも改変の時期を迎えている。即ち、これまでの実績を踏まえ、さらなる「物作り」への興味喚起と講義科目の理解促進を狙って、電気電子系以外の学生にも対応可能な教育プログラムの準備を進めている。すでに、生体医工学科の全学生(一学年の学生定員110名)を対象に、「三次元CADによる光造形」を主体とした実験実習を、「医工学研究センター」との連携の下、来年度から開始することが決まっている。

また、学部学生対象の教育プログラムだけでなく、大学院博士前期課程の実験実習科目として、研究のベースとなる幅広い技能・知識の育成を行う、アドバンスコースの開設も検討中である。講義と実験実習を組み合わせた授業形態(80人前後の受講生を1班5人程度の少人数班に分け、各班が毎週2コマ連続の授業を半期間で15回受講する)を予定しており、材料・

デバイス系, 特に, 最近進展の著しいナノ構造複合材料の作製と解析に関する総合的な知識と技能を, 専攻を横断した教員組織によって教育する。

従来の大学院教育システムは講義と研究に重点をおく研究者育成型であったが, 本教育プログラムは高度技術者の育成を視野に入れたものである。これは, 大学院特に博士前期課程が, 研究者育成の予備課程としてのみならず, 技術開発の基礎的トレーニングを受け幅広い視野を持った人材の養成を担務するという, 社会的要請に応えるものである。

当然のことではあるが, 大学院の教育は研究を通じて学ぶウエイトが高い。また, 学部においても, 主体的に研究や学習に取り組む総合的トレーニングが卒業研究であることは言を俟たない。本教育プログラムはこれらに代わるものでなく, 学部の早い段階で研究に匹敵する高度な内容を含む「物作り」の実験実習を体験させ, 学生が興味を持ってその後の学習に取り組むきっかけを作ろうとするものである。大学院においては, 専攻を超えた学際的な領域を他専攻の学生と一緒に学ぶことにより, 視野が広く柔軟な思考能力をもつ人材の養成を狙っている。

本教育プログラムの特徴を一言で云えば, 人的・金銭的・設備的制約の下で, 教員自身が「こんな授業を受けたかった」と思えるプログラムを受講学生と一緒に開発することであり, 社会的要請や学生気質の変化に対応した内容とするためには, 今後とも継続的な改良が必要である。

7. まとめ

半導体デバイスを中心としたエレクトロニクス材料・デバイスの作製に関する実験実習教育プログラムを, 電気電子系学部学生の正規授業の一環として長期間にわたって実施した経緯と内容, 結果を報告した。

この教育プログラムは「物作り」の面白さと重要性に目覚めさせることを目的に, 教員と大学院生のTAが一体となって実験実習課題の開発から授業の実施までを遂行した。受講生からの評価は高く, 「物作り」への興味喚起と講義科目の理解促進のみならず, 進学や就職における進路決定にも役立ったと好評であった。また, TAを担当した大学院生自身の教育にも効果があった。

この教育プログラムは18年間継続して実施され,

延べ6,500人を超える学部学生が受講した。また, 文部科学省から「特色ある私学教育」として計7年間の経費助成を受けた。この実績を踏まえ, 今後さらに電気電子系以外の学部学生教育に拡張するとともに, 大学院生を対象とした, より高度な学際的内容を系統的かつ効率的に教授する教育プログラムを新たに開発してゆく予定である。

謝 辞

本教育プログラムの開発と実施に協力いただいた歴代TAの大学院生諸君に感謝いたします。また, 常日頃から本教育プログラムをご支援いただき本稿の執筆を勧めて下さった大阪工業大学西川禪一学長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大阪工業大学電気システム工学科編: 電気電子システム実験Ⅰテキスト, 大阪工業大学 (2005), 17 - 46
- 2) 大阪工業大学電子情報通信工学科編: 電子情報通信実験Ⅱテキスト, 大阪工業大学 (2005), 126 - 190
- 3) 大阪工業大学自己評価委員会編: 大阪工業大学自己評価書1995年度版, 大阪工業大学 (1995), 227 - 235
- 4) 大阪工業大学電気電子システム工学科編: 電気電子システム実験Ⅲテキスト, 大阪工業大学 (2004), 46 - 69
- 5) 大阪工業大学教務部編: 大阪工業大学工学部シラバス電気電子システム工学科2005年度版, 大阪工業大学 (2005), 11 - 12

.....

著 者 紹 介

矢野 満明

昭49年早大・電気卒。昭55同大学院博士課程了。工博。同年帝人株式会社入社, 中央研究所勤務。昭62より大阪工大電子工学科講師。助教授を経て平4教授。平14より新材料研究センター長。応用物理学会, 日本材料学会, American Vacuum Society, Materials Research Society 各会員