

半導体工学に関する学生実験支援システムの開発

片岡 知美* 横内 亮介** 田中 雄大*** 矢木 正和****

Development of Support Systems for Students' Experiments on Semiconductor Engineering

Tomomi KATAOKA, Ryosuke YOKOUCHI, Takahiro TANAKA and Masakazu YAGI

Synopsis

The purpose of this study is the development of two experiment support systems to make students understand the contents of the experiments better. "Photoacoustic measurement of semiconductors" and "Measuring properties of LED" are performed as experiments for students in this college. However, semiconductor engineering seems to be one of the most difficult fields for students. So this study aims for more teaching effectiveness. In these systems, FLASH animations were used to explain the principles of semiconductor phenomena which are hard-to-imagine. Much attention has been paid to making these systems user-friendly. As a result, it is possible for students to understand them more easily.

1. はじめに

半導体工学は、他の電気系専門科目に比べてイメージしにくい分野であるにも関わらず、その基礎に関する学生実験はきわめて少ない。これは、半導体物性を調べるための設備に高額な投資が必要となるのが一般的である上、その扱いや測定方法が学生実験としては難しいためであると考えられる。

そこで、これまでに比較的手軽に実施可能な半導体工学の基礎に関する学生実験教材を検討し、半導体教育に効果的な2つの実験を提案した。「半導体の光音響スペクトル測定¹⁾」は半導体のバンド構造が、「発光ダイオードの特性測定^{2,3)}」はp-n接合におけるキャリアの振る舞いが、光学的特性測定を通して実感できる実験教材である。いずれも本格的な暗室を必要とせず、また使用機器も特別高価な機器を必要としない。現在これらの学生実験は、それぞれ本校専攻科1年生、電子工学科5年生を対象に実施されている。これらは、光物

性測定を経験しながら講義で学んだ半導体物性の基本事項を実感できる、数少ない有効な教材のひとつであると言える。

しかしこれらの学生実験を実施すると、学生は測定手順にばかり気を取られて、本来考えなければならぬ事柄にまで思考がおよんでいないように見受けられた。実験は興味を持って進められているものの、考察事項に取り組む者が少なく、半導体のバンド構造やキャリアの振る舞いを理解するという、最も重要な目的を果たせているとはいえない状態であった。その大きな要因のひとつは、やはり理解不足であると考えられる。本来ならば学生は、予習することによって実験の原理や概要を理解した上で実験を行うのが好ましい。しかし、学生の大半が予習をして来ないのが実状である。また、これまで扱ったことのない光学機器や、初めて行う光学的特性測定への戸惑いも影響していると考えられる。結果として、学生の理解は十分であるとは言えない状況であった。

そこで、より高い教育効果を得ることを目的として、実験を考えながら進行できるよう導く学生実験支援システムを作成した。これを用いることにより、実験前予習から測定方法説明、測定結果の解釈まで、一貫した指導が行える。

ここでは、今回開発した2つの学生実験に関する支援システムについて、その構成や内容、期待される効果を報告する。

* 専攻科 電子通信システム工学専攻
** 電子工学科
現 アイフォーコム東京株式会社
*** 電子工学科
現 福岡コミュニケーションアート専門学校
**** 電子工学科

2. システムの概要

図1に、今回開発したシステムの流れを示す。学生は、まず担当教員により実験の概要説明を受けた後、本システムを用いて「実験前予習」を行う。ここでは、半導体の基礎や実験に必要な知識を学習する。文章や静止画像だけではイメージしにくい事象の説明には、アニメーションを取り入れた。次に、「実験前予習」で学習した内容が理解されているかどうかを確認する目的で、「予習テスト」を行う。その正解率が80%に満たなければもう一度学習し直し、再度テストを行う。正解率が80%以上になれば、実験を開始する。実験は、「測定方法方法」に従って進める。予習や実験中に分からない用語があれば、「用語集」を開くことでいつでも説明が見られるようになっている。実験後には「まとめ問題」を行い、全問正解となれば実験は終了となる。「まとめ問題」は、検討事項を考える際の助けとなるような内容が出題される。全体として実験の流れに沿った構成となっており、学生たちが理解しながらスムーズに実験が進められるように配慮されている。

システム構築には、視覚効果による学生の実験に対する興味と理解度の向上を狙って、FLASHを用いた^{4),5),6),7)}。FLASHとは、Macromedia社が開発した、音声やベクターグラフィックスのアニメーションを組み合わせるWebコンテンツを作成す

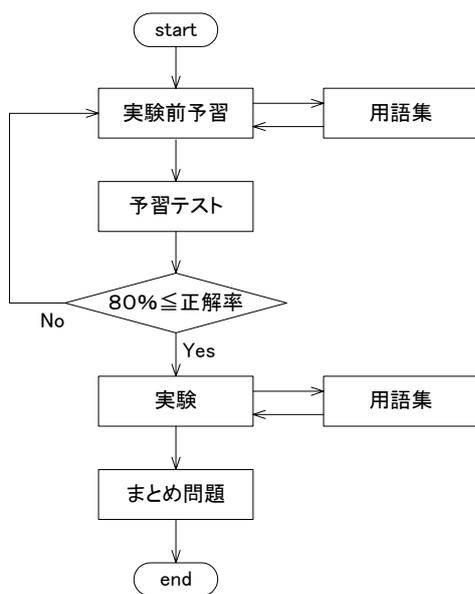


図1 システムの流れ

るアプリケーションである。これは動的コンテンツの作成が容易にできる上、豊富な機能を有する。アニメーションは動きが滑らかで見やすく、容量も小さい。また、JavaScript等のプログラムと併用することにより、ダイナミックなリンクが実現できる。現在FLASHプラグインの普及率は高くなっており、一般的なネット環境さえあればどこからでも活用できる。

本システムは、分かりやすい内容と使いやすい構成を心がけて開発された。使用するコンテンツを1画面内に収め、配置にも工夫がなされている。システムの表示サイズは850×600ピクセルで作成されており、14インチ以上のディスプレイで快適に閲覧できる。

3. 半導体の光音響スペクトル測定

3.1 実験内容¹⁾

本校の専攻科電子通信システム工学専攻1年生「電子物性」の授業で、半導体のバンド構造に関する学生実験として「半導体の光音響スペクトル測定」を行っている。半導体を評価するための物性測定手段として、光音響分光法(Photoacoustic spectroscopy: PAS)を採用した。光音響分光法は、密閉容器(試料室)内の試料に断続光を照射することで生じる圧力変化(疎密波)を、マイクロホンで検出する物性測定法である。

実験では、学生が光学的特性測定に不慣れであることを考慮し、まず身近な絵の具を測定試料とした予備実験を行う。これにより、光の色と波長の関係や、物質の色と光音響(PA)スペクトルの関係を理解する。

半導体材料の測定は、直接遷移型半導体(ZnS)および間接遷移型半導体(GaP)を測定試料として行う。半導体材料それぞれの基礎吸収に対応するスペクトルが得られることから、まず禁制帯の存在が実感できる。次に直接遷移型半導体と間接遷移型半導体のスペクトルを比較すると、直接遷移型半導体ではバンドギャップエネルギー(Eg)に対応する波長付近で急峻に変化するのに対し、間接遷移型半導体では間接遷移のEgに対応する波長付近から直接遷移のEgにかけて緩やかに立ち上がる。これらの結果を半導体工学の授業で学んだエネルギーバンド図と対応づけて考えることで、直接遷移型半導体と間接遷移型半導体の違いを実感することができる。

3.2 システムのレイアウト

図 2 は、「半導体の光音響スペクトル測定」の支援システムの画面である。「実験前予習」、「予習テスト」、「測定方法説明」、「まとめ問題」のメニューボタンを画面上部に、「用語集」を右上に配置している。それらの各ボタンをクリックすると、それぞれに対応するスライドシーンが指定の場所に呼び出され、表示される。メイン画面内の上部には、それぞれコンテンツの選択ボタンやページの進む/戻るボタンなどの各種ボタンが配置されている。

次に、各メニューのコンテンツ内容について説明する。

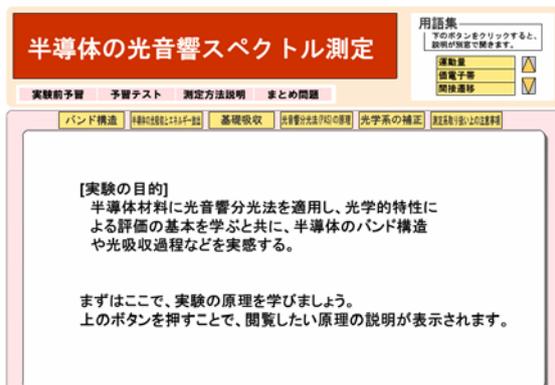


図 2 システムのレイアウト

3.3 実験前予習

ここでは、実験内容を理解するのに必要な知識を学生に予習させる。6つの原理説明のうち、4つにアニメーションを配置した。これらにより、学生には理解しにくい半導体内の現象やPASの原理などが分かりやすく説明されており、静止画像と説明文だけでは得られない学習効果が期待できる。なお、アニメーションは、再生ボタンをクリックすることにより何度でも再生が可能である。

図 3 は、直接遷移型半導体と間接遷移型半導体のバンド構造を説明している。光を照射すると、価電子帯から伝導帯に電子が励起させるアニメーションになっている。

図 4 は、物質に光を照射すると、反射・散乱、吸収、透過が生じる過程のアニメーションになっている。丸で囲まれた「吸収」がボタンとなっており、それをクリックすると、吸収されたエネルギーが化学変化、光、熱として放出されるという説明が表示される。

図 5、図 6 は、基礎吸収について説明している。短波長の光（紫色光）を照射すると電子は価電子帯から伝導帯に励起され（図 5）、長波長の光（赤色光）を照射しても電子は励起されない（図 6）様子が、アニメーションで表現される。いずれの場合も、スペクトルとカラーバーの該当する部分にポインタが表示され、光照射による電子励起の

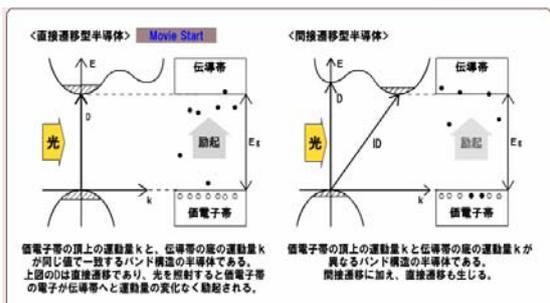


図 3 バンド構造

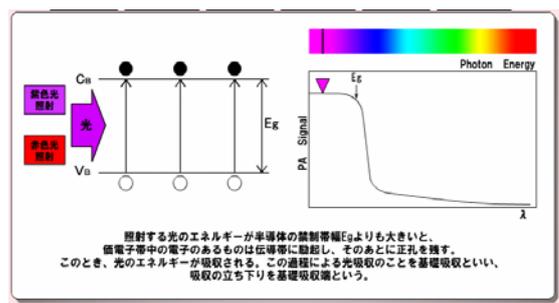


図 5 基礎吸収（紫色光照射）

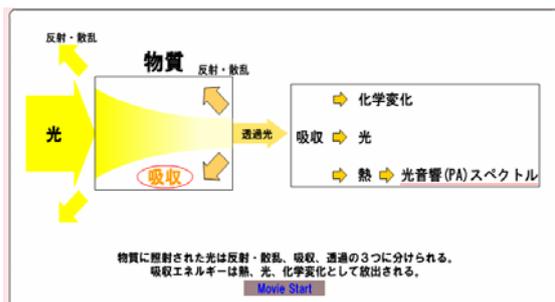


図 4 半導体の光吸収とエネルギー放出

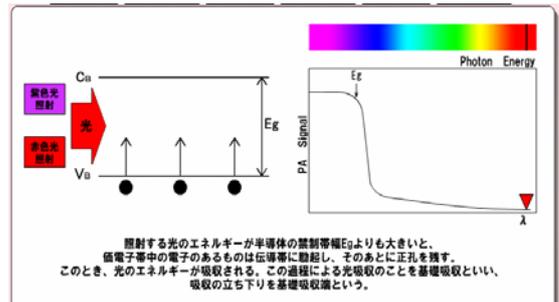


図 6 基礎吸収（赤色光照射）

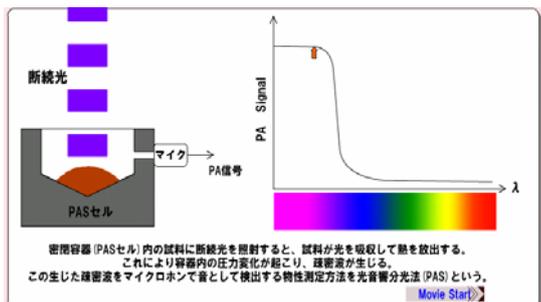


図7 PASの原理

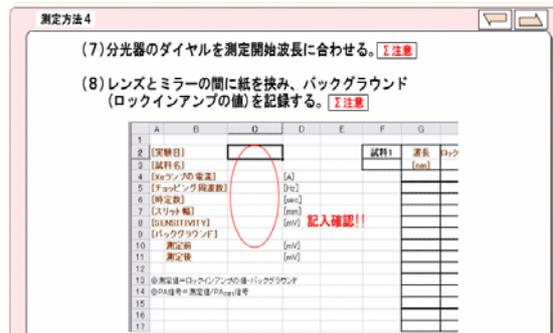


図9 測定方法

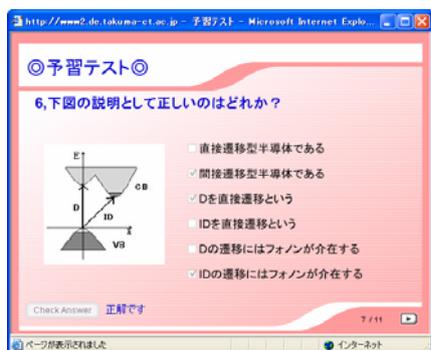


図8 予習テスト

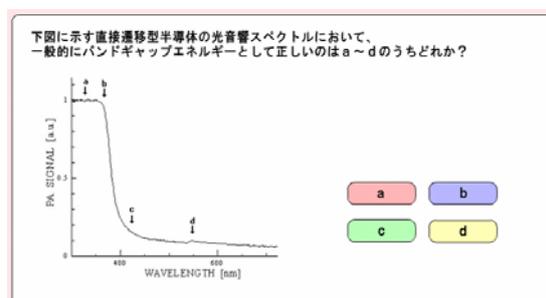


図10 まとめ問題

様子とスペクトルを対応させて考えられるように工夫されている。

図7は、試料室内の試料に照射する断続光の色変化に合わせて、スペクトル上をポインタが移動するアニメーションになっている。前述の図5、図6と併せて考えることで、この実験の測定原理が容易に理解できるはずである。

3.4 予習テスト

「予習テスト」では「実験前予習」で学んだ内容が出題され、それらが理解できているかどうかを確認する。

図8に「予習テスト」の一例を示す。これはクイズ形式の多肢選択式となっており、学生が楽しみながら進められるようになっている。問題は10問出題され、回答すると問題ごとに正解/不正解が表示される。全問回答すると、最後に正解率が表示される。正解率が悪ければ予習内容を復習させて再テストし、正答率が80%になるまでこれを繰り返す。正答率が80%以上になれば、実験を開始する。

このように、実験に必要な基礎知識を十分理解させてから実験に臨むことは、学生実験の教育効果を高める上できわめて重要である。

3.5 測定方法

「測定方法説明」では、測定方法が数ページに分けて掲載されている。それを1ページずつめくりながら実験を進めていけば、手順に沿った測定ができるようになっている。

図9に「測定方法説明」の一部を示す。ここでは「実験前予習」の場合とは違い、メイン画面の右上に配置された「進む」「戻る」ボタンをクリックすることで順番に各ページを表示する。こうすることで、測定手順を飛ばしてしまう心配が無い。また、掲載されている説明の各所に「注意」ボタンが配置されており、それをクリックすると注意事項が別窓で表示される。

3.6 まとめ問題

「まとめ問題」は、この実験の仕上げとして、測定結果の解釈に関する問題が出題される。ここでの問題に取り組むことで、レポート作成時に検討事項を考える際のヒントが得られるような内容となっている。

図10にまとめ問題の一例を示す。多肢選択式の問題が3問出題される。選択した答えが正解ならば次の問題に進み、不正解ならば正解するまで次には進めない仕組みになっている。

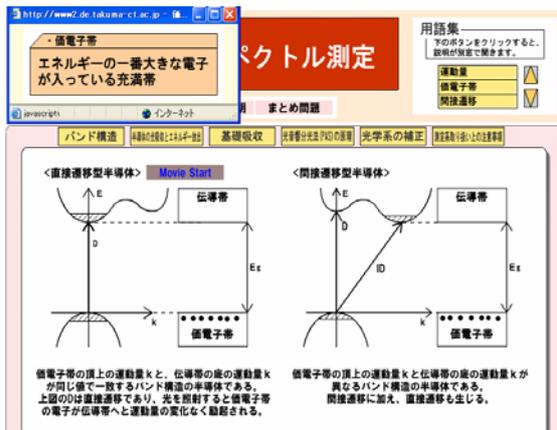


図 11 用語集

3.7 用語集

予習や実験中に分からない用語があればすぐに調べられるように、本システムの画面右上に「用語集」が準備されている。

全 24 項目の用語が 50 音順に並んでおり、各用語をクリックすると、図 11 に示すような別窓で解説が開く。これによりメインコンテンツと同時に用語解説を見ることができ、非常に便利である。また、FLASH MX のマスク機能を使用することで大量の用語を部分的に表示させ、表示領域を最小限に抑える工夫をしている。この機能を用いたことにより、用語をほぼ無限に増やすことが可能となっている。しかし、どんな用語の説明があるのか、全体がわかりにくいという欠点もある。

4. 発光ダイオードの特性測定

4.1 実験内容^{2),3)}

本校の電子工学科では、5 年生の工学実験で p-n 接合に関する学生実験として、発光ダイオード(LED)の特性測定を行っている。実験では、発光スペクトルと、電圧に対する電流と発光強度の変化を測定する。発光スペクトルからはそのピーク波長と半値幅を読み取り、発光色との関係を理解する。電流—電圧特性ではダイオードの電気的特性を、また発光強度—電流特性からは電流の増加に伴って発光強度も増すことを確認する。

LED において、発光は拡散電流成分によって起こり、流れる電流はその拡散電流と発光に寄与しない生成再結合電流の和から成る。したがって、発光強度と電圧の関係、および電流と電圧の関係をそれぞれ片対数グラフに描くと、その傾きには明らかな違いが現れる。また、小電流領域と大電

流領域における特性の変化も得られる。これらの現象について授業で学んだ知識を用いて考察することにより、p-n 接合におけるキャリアのふるまいが実感できる。

本実験は、その内容が半導体工学の授業で学ぶ内容に直接関係しており、また対数グラフの扱い方や意味を学ぶにも良い。さらに、最近開発された高輝度青色 LED を試料に加えることで学生の興味を引くことができるなど、利点は多い。

4.2 システムのレイアウト

図 12 は、「発光ダイオードの特性測定」の支援システムの画面である。「背景」、「予習テスト」、「実験 1」などのメニューボタンを画面左上部に配置しており、その下にある「用語集」をクリックすると、図 13 のようにタイトル部分が用語集に切り替わる仕組みになっている。

「背景」、「実験前予習」、「実験 1」、「実験 2」では、それぞれの項目ごとに最大 7 つのページから



図 12 システムのレイアウト

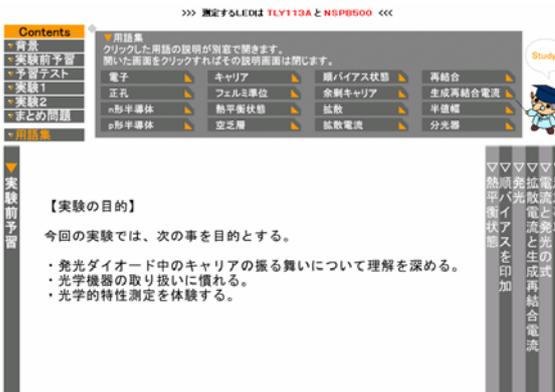


図 13 用語集を表示した状態

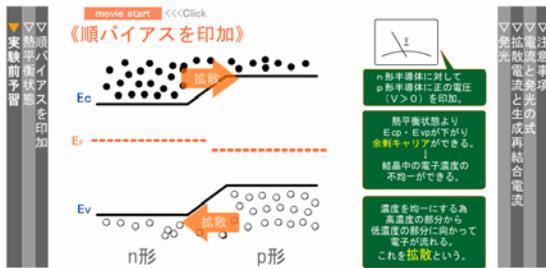


図 14 順バイアスを印加

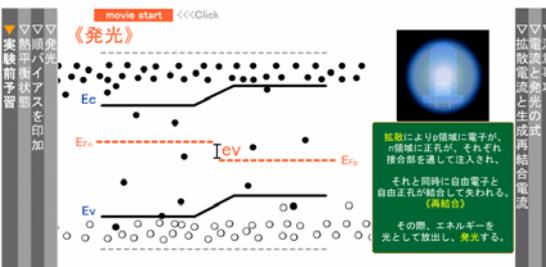


図 15 発光

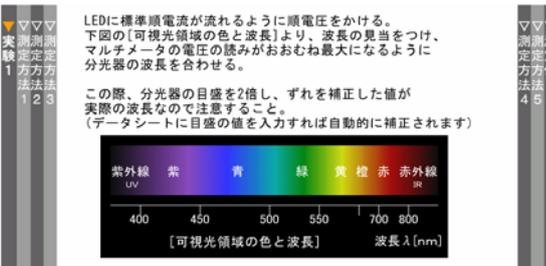


図 16 測定方法

構成されており、選択したページが紙芝居のようにスライドして出てくる。画面上部には、10個のLEDから測定する2個の型番がJavaScriptによってランダムに選択、表示されるようになっている。

次に、各メニューのコンテンツ内容について説明する。なお、「半導体の光音響スペクトル測定」の支援システムと重複する部分については、省略する。

4.3 背景

ここでは、LEDの歴史年表や身近な使用例を掲載している。まずLEDについて知ること、実験に対する興味を持たせる目的で掲載している。

4.4 実験前予習

ここでは、まずLEDの発光原理を「熱平衡状態」「順バイアス印加」「発光」の3段階、3ページに分けて解説している。図やアニメーションを用いることで、p-n接合の拡散・再結合過程におけるキ

ャリアの振る舞いを、イメージしやすくなっている。

図14では、p-n接合に順バイアスを印加した時に起こる拡散についてのキャリアの振る舞いを説明してある。順バイアスを印加すると、結晶内の電子濃度の不均一が生じ、これを均一にするために高濃度の部分から低濃度の部分に向かって電子が移動する様子をアニメーションで表わしている。

図15では、拡散電流によって電子と正孔の再結合が起こり、その際に光としてエネルギー放出される様子をアニメーションで表わしている。

4.5 測定方法

図16に測定方法の一部を示す。選択したページが紙芝居のようにスライドしてくるようになっている。「半導体の光音響スペクトル測定」の場合と異なり、順番通りに進まなくても見たいページを選択できるようになっている。

4.6 用語集

メニューボタン下の「用語集」をクリックすると、タイトル部分が用語集に切り替わる。これは、画面スペースを有効利用するための工夫である。表示された用語の中から知りたい用語をクリックすると、別窓で説明が表示される。この方法は、どの用語の説明があるか一目でわかって探しやすい反面、その枠内に収めなければならないため、掲載する用語の数に限りがある。

4.7 予習テストとまとめ問題

問題形式は「半導体の光音響スペクトル測定」と同様にクイズ形式で多肢選択式になっている。予習問題は10問、まとめ問題は4問ある。

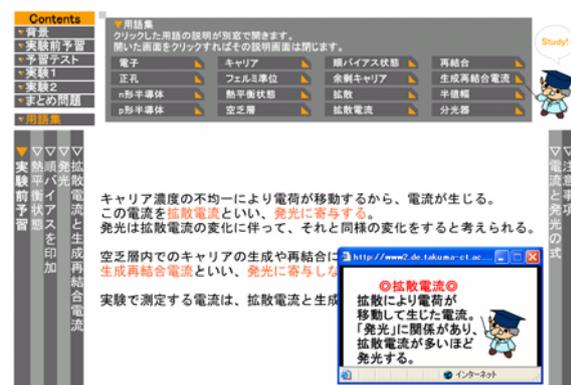


図 17 用語集

5. まとめ

学生実験「半導体の光音響スペクトル測定」と「発光ダイオードの特性測定」は、半導体工学の講義内容に実感を持たせる教材として準備された。今回、これらの実験をより効果的に実施する目的で、それぞれに関する学生実験支援システムを FLASH を用いて開発した。これらを利用することで、以下のような教育効果が望める。

- ・アニメーションを用いた解説により、実験原理などが感覚的に理解し易い。
- ・動的なサイトデザインによって、学生の興味を促す効果が期待できる。
- ・確認テストやまとめ問題に取り組むことで、実験前やレポート作成前に知っておくべき知識や考え方を再確認でき、実験全体の理解につながる。
- ・分からない用語があれば用語集によりすぐに調べることができるなど、その手軽さが学習意欲向上の一助となり得る。

本システムの導入により実験の理解やスムーズな進行を助けることで、半導体のバンド構造やキャリアの振る舞いをより実感できるようになると考えている。これらの実験が、半導体に興味を持つきっかけとなればと期待している。

なお、これらの学生実験支援システムは、Web 上で公開されている^{8),9)}。

参考文献

- 1) 片岡知美, 矢木正和, 第 66 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 8a-P4-20, 338 (2005).
- 2) 矢木正和, 第 45 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 30a-ZB-9, 472, (1998).
- 3) 矢木正和, 応用物理教育, 25, 9-14 (2001).
- 4) ランディング, 伊佐恵子, 佐々木信, ミート茂手木, “Flash MX Web Design Guide”, Mdn コーポレーション (2002).
- 5) 保坂庸介, “標準 Web デザイン講座 FLASH MX”, 翔泳社 (2003).
- 6) 小野晴世, 黒木創, “JavaScript スタイル辞典”, 香和システム (2003).
- 7) 柳澤誠, “FLASH MX Action Script Web インターフェース編”, 香和システム (2003).
- 8) <http://www2.de.takuma-ct.ac.jp/~yagi-lab/PAS/PAS.html>.
- 9) <http://www2.de.takuma-ct.ac.jp/~yagi-lab/LED/LED.html>.