

報 文

コンピュータを用いたプラズマ自動計測
システムによる教育訓練

大阪職業訓練短期大学校電子情報システム系 松村幸輝

Education and Training by a Computer-Aided
Probe-Measurement System for Plasmas

Koki Matsumura

要 約 電子工学実験では主に各種半導体電子素子の原理・特性や集積回路などのマイクロエレクトロニクスデバイスの作成の基礎についての理解を深めることを目的として学習を進めているが、その計測および制御にパソコンを利用した教育システムを取入れている。これは、パソコンと実験・測定装置を GP-IB でインターフェイスをとり、自動計測および自動制御を可能にするもので、コンピュータ支援による教育効果の向上を図るとともに、急速に進展する高度情報化社会のあらゆる分野で活躍しうる、ハードウェア・ソフトウェアに習熟した有能な実践技術者を育成することを目的としている。本論文は、その一例として、電子工学応用分野の基幹産業ともいえる IC の製造工程で重要な役割を果すプロセス用プラズマの自動計測システムを開発したので、このシステムの概要とこれを電子工学実験に用いた場合の教育的効用について述べる。

I まえがき

高度情報化社会が急速に進展するに伴って、あらゆる分野にコンピュータシステムが利用されるようになってきている。応用例を数え上げればきりがないが、設計、製造、流通、事務処理、意志決定、教育、家事などの分野で、FA、OA、LA、SA、HA 化が進んでいる。これは、あらゆる物事を遂行する場合、コンピュータを用いることによって正確、高速かつ簡便に実時間処理をすることが可能であることから、その多くの部分をコンピュータが取って代り、補助的あるいは主体的に利用されているためである。そして今後益々、この分野での技術者、技能者の需要が高まることが予想される。このような現状から高等教育機関では、産業界の現場で活躍しうる、ハードウェア・ソフトウェアに習熟した有能な実践技術者を育成することが要望されている。

このことを考慮して、カリキュラムを作成するうえでもコンピュータに携わる時間をできるだけ多くするため、コンピュータ演習などのコンピュータ教育に関する専門科目だけでなく、あらゆる教育現場でコンピュータを利

用した実験・実習を試行するよう配慮する必要があるものと思われる。そのため本学では学生実験のひとつである電子工学実験において計測および制御にパソコンを利用した教育システムを試作し、これを教育訓練に用いている。例として、電子工学実験では各種半導体素子の原理・特性に関して理解を深めるとともに、集積回路などのマイクロエレクトロニクスデバイスの作成の基礎について学習を進めているが、その一部のテーマについては、パソコンと実験・測定装置を GP-IB インターフェイスで接続することによって、計測、制御あるいはデータ解析を自動化している。これにより習得が困難な教材でも理解しやすくなるよう教育の効率化を図るとともに、コンピュータの利用技術について学習している。

今回、具体的な実験テーマの例として IC の製造工程で重要な役割を果すプロセス用プラズマのプロープ測定を取り上げた。そしてシングルプロープによるプラズマ計測の原理に基づいてコンピュータ自動計測システムを試作し、これを実際の授業に用いた。したがって本論文では、試作したプラズマ計測システムの構成と実験方法を述べ、電子工学実験のひとつの項目であるプラズマ計測に用いた場合の教育効果について検討した。

論文受付日 1990. 8.23

II プラズマ計測システム

コンピュータを用いた教育システムを構築するに当っては、学習内容の専門的知識を習熟したうえでシステムの設計およびコースウェアの作成に取り掛からなければならない。ここではまず、プラズマプロセスとプローブ測定の意義および原理について述べ、試作した本システムの概要を明らかにする。

1 プラズマプロセスとプラズマ計測

プラズマプロセスは、気体放電で生成されたイオンや励起粒子、あるいは活性種などの気相反応や固体表面との反応を利用した薄膜の作成および加工技術で、集積回路などのマイクロエレクトロニクスデバイスの作成においてその利点や重要性が認識され、広く利用されている。従来から、Siウエハなどの半導体基板あるいは絶縁基板上に半導体薄膜や絶縁薄膜を形成する方法として、熱CVD (Chemical Vapor Deposition) 法、エピタキシャル法あるいは熱酸化法などのプロセスが用いられているが、これらは基本的には高温による組成元素の化学反応に基づくため、Siウエハの不純物の再分布やその原因となり、サブミクロンデバイスの作成において問題がある。一方、プラズマプロセスは、処理温度が比較的低温であるため良質の薄膜を生成することが可能であるなど、多くの優れた特長を有している。しかしプラズマプロセスによって作成される薄膜の性質はプラズマの状態によって強く依存するため、生成方法や条件に微妙に変化するプラズマの状態を明確にし、かつ制御することがこのプロセスにおいて重要なことである。またこれは、高品質のデバイスを作成するうえで安定したプラズマを得るためだけでなく、生成する薄膜の成長速度や膜質を制御するのに薄膜の成長過程の解明が必要なためである。このことから、プラズマの性質を定量的に把握するため、プラズマの状態を明示しうる電子温度、電子密度および空間電位などのプラズマパラメータを正確かつ簡便に測定する方法が種々検討されている⁽¹⁾。

プラズマパラメータの測定法としてはプローブ法⁽²⁾、発光分光分析法⁽³⁾、吸光分光分析法⁽⁴⁾、マイクロ波診断法⁽⁵⁾、レーザ誘起蛍光分光分析法⁽⁶⁾、質量分析法⁽⁷⁾などがあるが、本システムは簡便で一般的なラングミュアプローブ⁽⁸⁾による測定法を用いている。しかしこの測定法は比較的容易である反面、解析が複雑で実時間内での処理が困難である。したがって、この測定法はコンピュータを用いた自動解析が必要かつ重要で、コン

ピュータ利用教育には最適なテーマであると思われる。ただ、この測定法の原理・理論を学習者に十分理解させ、単に自動測定の手順のみ習得するだけではないことを認識させなければならない。そのために学習者自身がマニュアルで測定し、そして解析することも併せて指導することも必要である。

2 ラングミュアプローブ法

本システムに用いたラングミュアプローブ法の原理について述べる。原理的な測定回路と典型的なプローブ電流-電圧特性を図1に示す。この図で I_p 、 V_p はそれぞれプローブ電流と電圧、 I_e 、 I_c はイオン電流と電子電流、 V_s 、 V_f はプラズマの空間電位および浮遊電位である。同図(b)のプローブ特性はリニアグラフで描かれた理想的なものであるが、比較的是っきりと区別し得る3つの領域、すなわち、(I)電子電流飽和領域、(II)電子電流流入領域、(III)イオン電流飽和領域、が存在する。しかし実際の測定結果は、プローブの形状によっても異なるが、図のようなはっきりと3つの部分に区別されることはまれで、特に電子電流飽和領域では破線で描かれるように漸増することが多い。

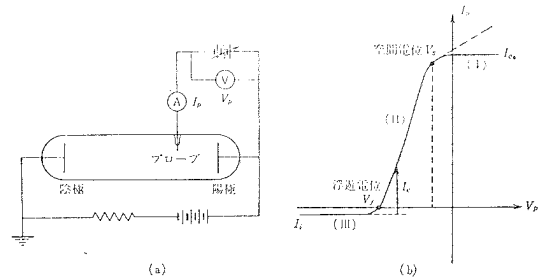


図1. ラングミュアプローブ法における測定回路(a)とプローブ特性(b)の原理図

ここで、プラズマ粒子はマクスウェルの速度分布則に従うものとするれば、電子温度、電子密度および空間電位などのプラズマパラメータは次のようにして求められる。まず、これらのパラメータの関係は次式で表される。

$$I_c = I_p + I_e = I_{eo} \exp(-eV/kT_e) \quad (1)$$

$$I_{eo} = J_{eo} A_p \quad (2)$$

$$J_{eo} = N_e e v_e / 4 = N_e e (kT_e / 2\pi m_e)^{1/2} \quad (3)$$

$$V = V_s - V_p \quad (4)$$

ここに、 T_e は電子温度、 k はボルツマン定数、 J_{eo} はプローブに流入する電子による電流密度、 N_e はプラズマの電子密度、 v_e は電子の平均速度、 A_p はプローブ表

面積である。これらの式から、次式を得る。

$$\log_e I_e = \log_e I_{e0} - (eV_s/kT_e) + (eV_p/kT_e) \quad (5)$$

両辺を V_p で微分することによって、次式

$$d \log_e I_e / dV_p = e/kT_e \quad (6)$$

が得られる。すなわち、 I_e の V_p に対するセミログプロットの傾斜から電子温度 T_e を求めることができる。実際的な方法として、セミログプロットされたグラフの直線部分にある2点の座標から簡単な連立方程式を用いて求めることができる。また、(I)と(II)の部分の2直線の交点は空間電位 V_s を与える。その点における電子電流 I_{e0} は式(2)、(3)で与えられるので、 A_p を cm^2 、 I_{e0} を Amp、 T_e を K、 $V_s (=kT_e/e)$ を V の単位で表せば、電子密度 $N_e (\text{cm}^{-3})$ は、

$$N_e = 4.03 \times 10^{13} (I_{e0}/A_p T_e)^{1/2} = 3.73 \times 10^{11} (I_{e0}/A_p V_s)^{1/2} \quad (7)$$

となる。

以下は、この原理に基づいてコースウェアを作成したものである。

3 システムの構成

本システムは、(1)プラズマの生成、(2)プローブによるプラズマ計測とデータ取り込み、および(3)コンピュータによる実験データの処理、の3つの部分で構成されている。

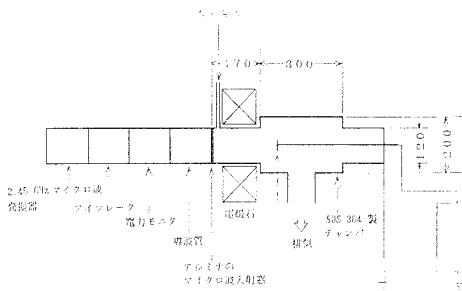


図2. ECR マイクロ波プラズマ発生装置(寸法の単位はmm)

プラズマ生成部は、図2に示されるように、SUS304ステンレススチール製チャンバとマイクロ波発振部から構成されている⁽⁹⁾。放電方式は電子サイクロトロン共鳴(ECR)条件を備えたマイクロ波放電である。なお、マイクロ波発振器で発生した2.45 GHzのマイクロ波は、導波管内を伝播し、アルミナの入射窓を通じてチャ

ンバに導かれる。磁場は2.45 GHzのマイクロ波との相互作用によって電子サイクロトロン共鳴の生じる875Gsに設定されている。プラズマは主に電磁石の中心部で発生する。

この方式によるECRプラズマは、(1)高真空領域で安定すること、(2)無電極放電であること、かつ磁場によってプラズマを絞ることができるのでプラズマとチャンバ内壁の接触が抑えられることから、電極や管壁からのスパッタ粒子などの不純物の混入を防ぐことができる、などの極めて重要な利点を有しており、ULSIの製造工程における微細化プロセス用プラズマとして有望であると考えられている。

プラズマの生成は、ガスの種類とガス圧、およびマイクロ波電力などの外部条件を制御することによって行なわれる。本実験の場合は、ガスは窒素ガスを用い、ガス圧を 10^{-2} Pa~13 Pa、マイクロ波電力を250~700 Wとした。

プローブ測定および測定結果の解析のための計測システムの構成図を図3に示す。プローブは表面がよく洗浄された直径15mmのステンレス円板で作成したもので、電磁石の中心部から6 cm離れたところに設置した。そして、プローブにファンクションジェネレータで発生した三角波電圧を印加し、このときの電圧およびプローブに流れる電流をデジタルストレージオシロスコープ(岩崎通信機製DS-6121A)を用いて測定し、その値をAD変換して記憶させた。さらに、それらの値をGP-IBインターフェースからパソコンに取り込み、フロッピーディスクにファイリングした後、各パラメータを計算し、ディスプレイに表示するとともにプリントアウトする。また、プローブの電流電圧曲線はリニアおよび片対数グラフ上でプロットするようになっている。

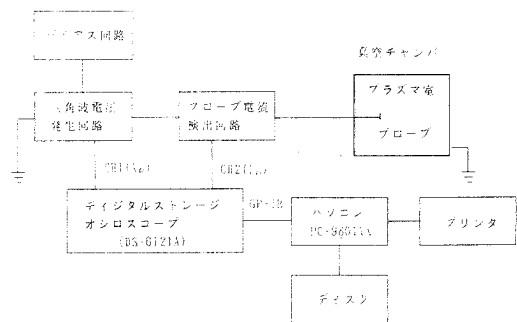


図3. プラズマ自動計測システムの構成図

パソコンによる実験データの処理は、図4のフロー

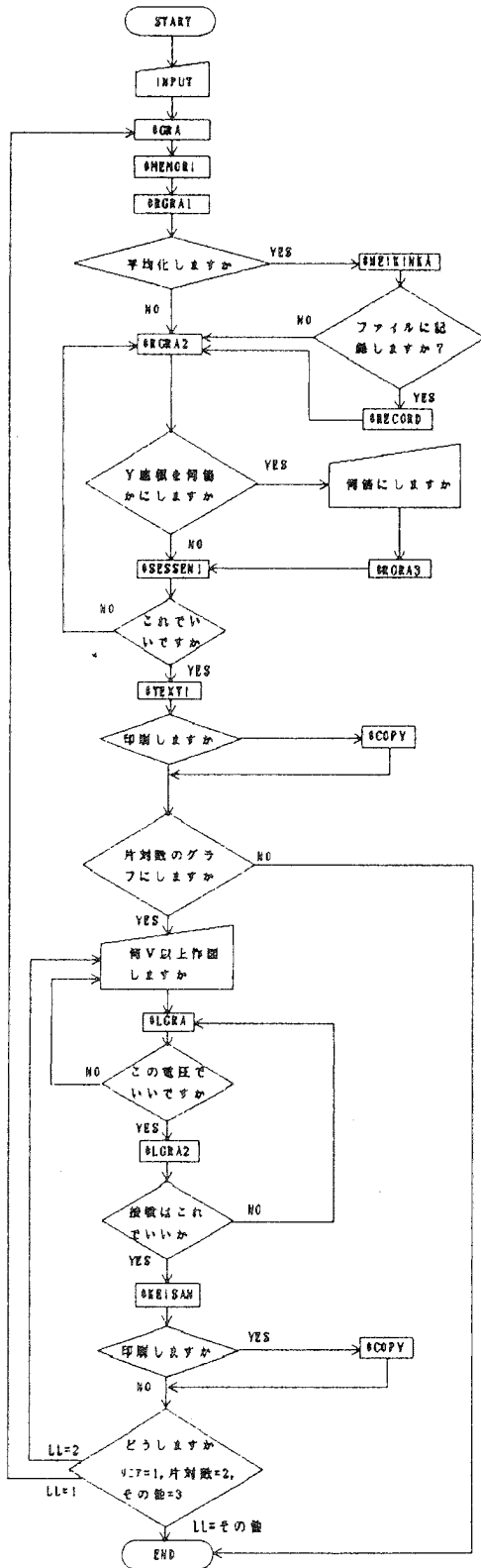


図4. 処理手続きのフローチャート

チャートで示されるような手順で行なった。ハードウェアは、日本電気製パソコン NECPC-9801VX で、メインメモリ640KB、5 インチ2HD のディスクドライブを2台内蔵している。またプログラムは、MS-DOS 上で動作する BASIC 言語で作成した。

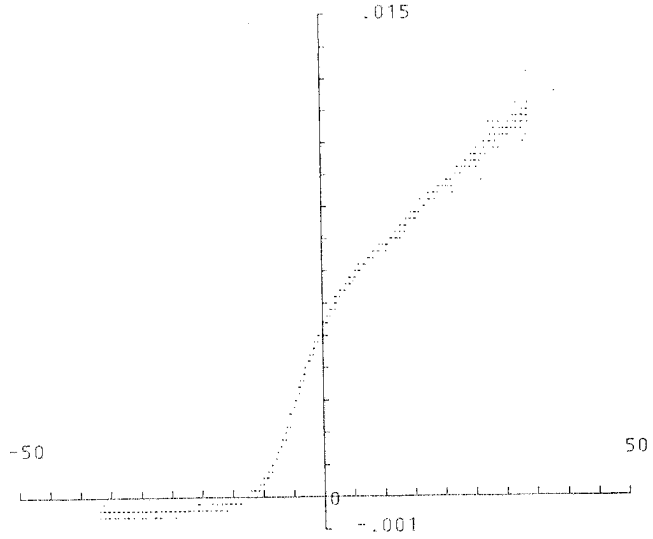
処理の方法は大別して次の3つの部分から構成される。

(1) 先ず、上の方法で電流と電圧の値を測定し、GP-IB インターフェースを介してパソコンに入力し、電流と電圧の関係をリニアグラフ上に作図する。この例を図5に示す。1回の測定で得られる電流および電圧のデータ点の数はそれぞれ2048あるので、広範囲でデータのばらつきがみられる。

(2) 次に、測定値の平均化を行ない、同様にリニアグラフ上に作図する。図6に上の測定値について平均化した結果を示す。ここで、プラズマの電子温度は片対数グラフ上においてプローブ電位がプラズマ空間電位よりも低い領域、すなわち電子電流入入領域およびイオン電流飽和領域での電流-電圧直線の傾きから計算される。この場合、この領域で測定されたプローブ電流の値は電子電流だけでなくイオン電流が含まれているので正確な電子温度を測定するためにはプローブ電流からイオン電流成分を差引く必要がある。電子電流成分を求める方法として、イオン電流飽和領域での電流電圧特性に接線を引いて外挿補正を行なうが、本システムではリニアグラフ上に表示されたイオン電流飽和領域での電流電圧特性の直線部分を最小二乗法によって求め、この直線で外挿補正して電子電流成分を算出するようにした。このようにして求めた外挿補正の直線を同図に併せて示している。また、本システムは、特性を適当な大きさに拡大、縮小することも可能で、例として、同図に特性(a)を5倍に拡大した特性(b)を示す。

(3) このようにして得られた電流および電圧の各値を片対数グラフ上に表示し、この電流電圧特性からプラズマの各パラメータを算出する。先ず、片対数プロットした電子電流入入領域および電子電流飽和領域の直線部分をそれぞれ最小二乗法によって求める。そして、IIの2節で述べたように、電子電流入入領域の直線の傾きから電子温度を、2直線の交点からプラズマ空間電位を、またその交点での飽和電子電流の値から電子密度をそれぞれ算出する。図7は片対数プロットした例で、各パラメータの計算結果が表示されている。以上のパソコンを用いた操作によって、迅速にしかもより正確にプラズマを解析することが可能になる。

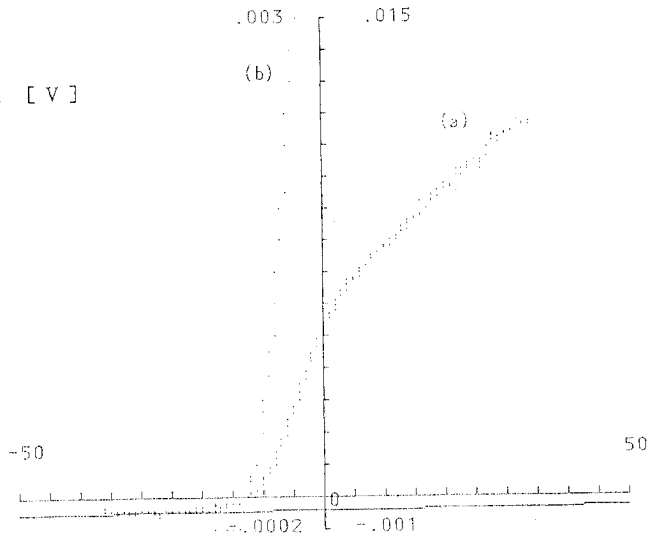
今日の日付は 何月? 3
 何日? 12
 何番目? 3



2016 34 240 -36.8
 平均化します。よろしければ、キーインしてください。?

図5. プローブ特性

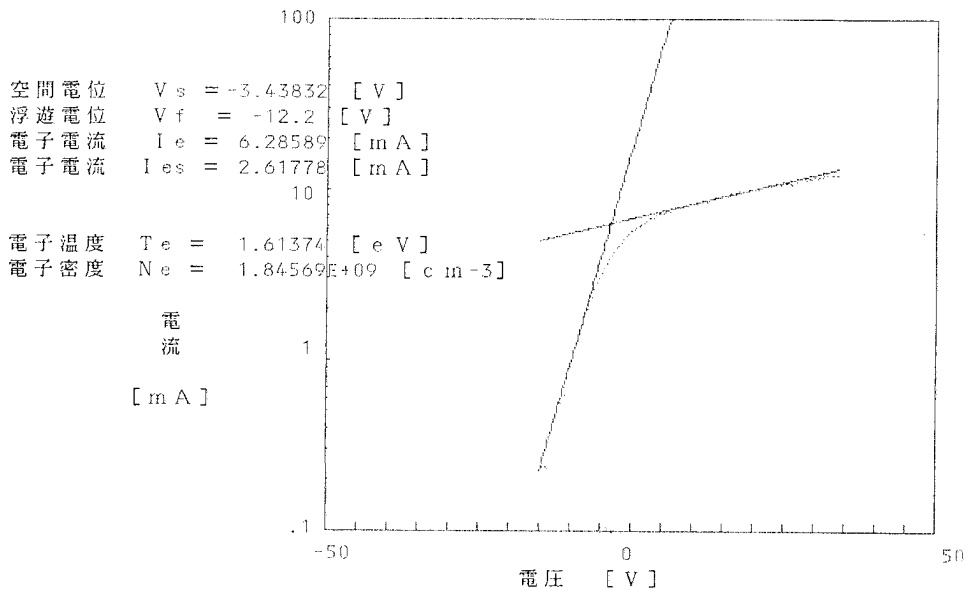
浮遊電位 $V_f = -12.2$ [V]



印刷しますか (印刷するなら 1 のキー、印刷しないならその他のキーを押す)? 1

図6. 測定値を平均化したプローブ特性.

実線はイオン電流飽和領域の測定値を最小二乗法から計算した直線.
 また、(b) は(a) を5倍に拡大したもの.



印刷しますか(印刷するなら1のキー、印刷しないならその他のキーを押す)? 1
 どうしますか。(リニアに戻る=1、片対数に戻る=2、終わる=その他のキー?)

図7. 片対数プロットしたプローブ特性とプラズマパラメータ。

Ⅲ 教育システムとしての効用

本システムによる教育・訓練の主な目的は、(1)教科内容であるプラズマの意義と解析法の理解を深めるとともに、(2)計測に用いる各種測定機器の取り扱い法、および(3)コンピュータ操作法の習得である。本来、コンピュータを利用した教育システムは教材の教育的働きを十分に発揮させる条件を整えるための支援システムと位置づけられており、いいかえれば、コンピュータの利用価値は、学習内容が複雑で、理解し難い教材であっても、学習者が興味深く取掛かれ、理解しやすいように援助することにあるといえる。したがって、本システムはこの概念に沿うものと考えられる。

ここで、本稿で述べたコースウェアは、本学電子科のカリキュラムに設けられている専門教科目(教科名「プラズマ工学」)で学習した内容を、実習・実験を通して習得することを目的として試作した一例である。この専門教科目は主に、集積回路用半導体素子の作成を目的として用いるプロセス用プラズマの基礎と応用について学習するものであるが、この理論・手続きを電子工学実験の種々のテーマで実験・実習している。例えば実験テーマとして、(1)真空技術の基礎、(2)気体放電現象(DC放電、RF放電、マイクロ波放電、ECR放電)、(3)プラズ

マ計測、(4)プロセス用プラズマの基礎と応用(スパッタリング、プラズマCVD等)などがあり、プラズマ計測はその基本的概念を理解する上で重要な部分に位置するものである。したがって、これを理解することによってプロセス用プラズマの利用方法、および集積回路作成に関する全体の概要を把握しやすくなるものと考えられ、上述した教育効果があるものと思われる。

次に、実際にこのシステムを用いて実験した学習者(本学2年生25名)にアンケート調査および意見聴取したので、その結果について検討する。アンケートの内容および結果を表1に示す。アンケートの各質問は主にこのシステムの教育効果に関するもので、質問に対する回答の形式は、選択式と記述式の2種類で構成されている。

問[1]の学習効果に関する質問に対して、全体の6割以上の者がコンピュータを用いたこのシステムによって学習効果が上がっていることを認めている。その理由として、問[2]の回答例にみられるように、実験方法や結果の処理などにパソコンのもつ機能を十分に活用することができることがその大きな要因であると推定される。また、問[3]の回答結果は、プラズマ計測を理解することについても役に立っていることが示されている。

問[4]は、このシステムを用いたときの「やる気」についての質問であるが、全体の半数以上が「やる気が

表1. コンピュータを用いたプラズマ自動計測システムに関するアンケート

[1] コンピュータを用いたシステムによって学習効果は上がったと思いますか。(選択式)

- (1) 上がった。 64%
- (2) 変らない。 24%
- (3) 上がらない。 4%
- (4) その他。 8%

[2] このシステムにより学習効果は上がるとした場合、その理由はなんですか。(記述式)

主な回答例

- (1) 理解が容易であった。
- (2) パソコンが好きなので興味ももてた。
- (3) 処理が自動化されているので、簡単で、計算がはやい。
- (4) プラズマ状態が不安定で測定が困難なときでも、何度も実験できるのでデータを出しやすい。
- (5) 測定機器の動作原理だけでなく、コンピュータの利用方法がわかった。
- (6) GP-1B の利用方法がわかった。
- (7) 操作性がよく、便利であった。
- (8) ディスプレイに整然と表示されることによって次に何をやるかというような発想が促された。
- (9) コンピュータが好きなので実験に取っ付きやすかった。
- (10) マニュアルだと有用でない不安定なデータと思われるものでも一応時間をかけて処理しなければならないが、自動化すると不必要なデータに割く時間が短縮でき、原理・理論など教材の主旨を理解するために時間をかけることができる。
- (11) その他。

[3] コンピュータを用いた方がプラズマ計測の理解がしやすいですか。(選択式)

- (1) 大変しやすい。 12%
- (2) しやすい。 56%
- (3) どちらも同じ。 12%
- (4) しづらい。 8%
- (5) 大変しづらい。 4%
- (6) その他。 8%

[4] このシステムを用いて実験した場合のやる気はどうでしたか。(選択式)

- (1) 大変あった。 16%
- (2) あった。 40%
- (3) 普通。 24%
- (4) なかった。 8%
- (5) 全然なかった。 4%
- (6) その他。 8%

[5] このシステムでの学習の前後でプラズマ工学の講義内容の理解の程度は変化しましたか。(選択式)

- (1) このシステムでの学習の後、理解しやすくなった。 64%
- (2) あまり変らない。 20%
- (3) このシステムでの学習前の方が理解が容易であった。 8%
- (4) その他。 8%

[6] その他の実験テーマについてもコンピュータを用いた教育システムを利用したいですか。(選択式)

- (1) したい。 60%
- (2) どちらでもよい。 20%
- (3) したくない。 8%
- (4) その他。 12%

[7] コンピュータを用いたプラズマ自動計測システムの良い点と悪い点を挙げてください。(記述式)

主な回答例

| 利 点 | 欠 点 |
|---|---|
| はやく理解できる 興味ももてる 何度も実験できる 計算をしなくてよいので らく | 内容がわかりにくい 手続きがめんどう 操作方法を理解するまで が困難 計算をしなくてよいので 安易すぎる |

あった」と答えており、意欲を高めるにも効果的であることを示している。また、問[5]の質問に対して、このシステムによる学習の後、「プラズマ工学の内容が理解するのが容易になった」と6割以上の者が回答している。問[6]でも、他の実験テーマについてもコンピュータを用いたシステムを利用したいと回答した者が6割いた。これらの結果から、パソコンは生活の中で慣れ親しんだものであり、パソコンを操作することによって学習内容が身近なものとなり、またやる気も出たものと思われる。

一方、問[7]での回答例にみられるように、「内容がわかりにくい」などの欠点が挙げられているが、このシステムによる実験を行なうのに先立って、学習者にこのシステムの意義と内容に関して十分説明し、理解を求めておく必要があるものと思われる。

以上の結果から、本システムは教育訓練において効果的であるものと思われる。ただ、このシステムを用いた実験の意義などについて学習者の理解を得ること、そしてまたその方法などについて検討する必要もあり、今後改良する余地が残されている。

IV あとがき

コンピュータを利用して学習者の理解を容易にすることを目的として、パソコンによるプラズマ自動計測システムを試作した。このシステムは、集積回路作成のために用いるプロセス用プラズマについて、解析が複雑で処理が複雑なラングミュアプローブ法によるプラズマパラメータの測定をパソコンを用いて自動化したもので、実際のプラズマ計測に有用であるとともに、コンピュータ利用教育のための適切なテーマと考えられる。

本稿では、まず、プラズマプローブ法の原理に基づいて試作したプラズマ計測システムの構成および実験方法について述べた。そして、このシステムを実際に電子工学実験で試行し、学習者にアンケート調査による意見聴取を行ない、このシステムの教育効果について検討した。その結果、(1)コンピュータを用いたシステムによって学習効果が上がった、(2)教科内容の理解が容易になった、(3)やる気が出た、(4)実験に関係した測定装置の動作原理だけでなく、コンピュータの利用方法が理解できた、等の利点を認めた回答を得た。

以上のことから、本システムは教育訓練においてきわめて効果的であると思われる。なお、今後、より学習内容の理解を深めることおよび教育訓練の高効率化を目的として、手続きや操作性などの点についてシステムの改

良を図っていくとともに、測定時に生じる多様な問題に対応しうるシステムを作成することが課題となる。

参考文献

- (1) 小林他, 電学論, A.109,69(平1-2).
- (2) I. Langmuir, G. E. Rev.,26,731(1923).
- (3) 小沢, 真空, 25,25,(1982).
- (4) 橘, 応用物理, 53,606(1984).
- (5) R. H. Huddlestone et al, Plasma Diagnostic Techniques, Academic Press, New York(1965).
- (6) V. M. Donnelly et al, J. Vac. Sci. Technol.,21,817(1982).
- (7) M. Konuma et al, Proc.7th Int. Conf. Vacuum Met. Tokyo,560(1982).
- (8) H. M. Mott-Smith and I. Langmuir, Phys. Rev.,28,727(1926).
- (9) K. Matsumura, J. Appl. Phys.65,5101(1989).