



## 研究室紹介

## 電気工学第五講座

平木 昭夫\*

本講座は、電気工学教室に於て、電気物性という看板の下で、教育・研究に当たっている。当研究室が担当している講義は、量子物理学と電気物性（以上学部）、量子電気工学Ⅰ及び電気物性特論Ⅱ（以上大学院）である。

研究室の構成は、平木昭夫教授、田口常正講師、伊藤利道助手、川原田洋助手、大寺洋技官である。

構成員の学歴は多彩で、平木は阪大理学部、田口は東京電機大を経て名古屋工大、川原田は早大理工学部、大寺は近大理工学部の出身で、唯、伊藤のみが阪大工学部しかも当第五講座の生え抜きである。従って、それぞれのバックグラウンドが発想法や研究の進め方に顔を出して来るので、平木の総括の下でその長所を伸ばすことが、研究室発展の鍵である。

本講座は半導体物質全般についての理解と応用に関する研究を行い、またこれを通して学生教育を行うという少し欲張った方針の下で次の5つの研究グループより構成されている。

すなわち、本講座は、種々の半導体物質を中心に新しい機能物質の作成及びその物性（特に表面・界面物性）と応用についての研究を目指している。なお、応用については、“Complete understanding leads to complete application”をモットーとしてのアプローチをとっている。そのため基礎的な研究法を重視している。研究手段は、光、電子及びイオンを用いる分光法と（断層）電顕法などである。新しい物質としてはダイヤモンド薄膜や高温超電導などがある。

また、5つの研究グループの研究テーマと主たる責任担当者は次の通りである。

## 1. ダイヤモンド薄膜の作成（川原田助手）

2. 新しいシリコン技術の開発（伊藤助手）
3. III-V族化合物半導体の超格子（産業科学研究所 中島尚男教授〔電気工学専攻(大学院)担当〕との協同研究で伊藤助手）
4. II-IV族化合物半導体の素子化（田口講師）
5. 新物質（高温超電導など）の開発への戦略（平木教授）

研究テーマの番号は、分類の都合上1のダイヤモンドより順次5までになっているが、平木の研究の歴史から言えばこの順番付けはそうではない。従って以下、何故このようなテーマをもつようになったかを簡単に紹介することにする。

平木が当講座創成と共に、講座担当の故川辺和夫教授の下に助教授として、電気第4講座より着任した当時の研究テーマは、Ge(ゲルマニウム)とSi(シリコン)半導体の格子欠陥であった。1970年、米国カリフォルニア工科大学のJ.W. Mayer教授に招かれ渡米した。当時珍しかった（数百万電子ボルトに加速された）高速Heイオンによるチャンネルリングと後方散乱法によりSi中の格子欠陥の一種であるAu(金)の格子間原子を測定することが当初の研究テーマであった。この研究の成功のポイントは、出来るだけ多くのAu原子をSi結晶の格子間位置に入れるかであった。そこで、色々工夫している間に、偶然にもAu原子導入のためにSi結晶面に蒸着したAu膜上で100℃という低い温度にて奇妙な現象が認められるのに気付いた。これはSiとAu膜の境界（これをSi/Au界面という）から、Si原子が湧き出すように噴出して、Au膜の粒界を通過してAu膜上に析出する現象であった。そのため空気中でこの試料を熱するとAu膜上にSiの酸化(SiO<sub>2</sub>)膜が成長してゆくことになる。Siはダイヤモンドのすぐ次の弟であるから、その結晶は強く固く、

\*平木昭夫 (Akio HIRAKI), 大阪大学工学部, 電気工学科, 教授, 理学博士, 電気物性

従って融点も1400°Cと高い。それがAuと接触するSi/Au界面では100°Cで(もっと詳しく調べると室温、いやそれ以下の温度でも、AuのみならずPtとか多くの金属が接触すると)Siが一種の融けた状態となる。このため容易にSi原子が湧き出すことが出来て、前記の現象となり、筆者により見出されたのであった。このことは早速1970年に学術誌であるApplied Physics Letters (APL)とJournal of Applied Physics (JAP)に発表された。この論文は新しいSi-金属低温界面反応現象についての報告として、強い反響を米国、特にIBMとベルの研究所に引き起こした。早速IBMは多くの金属とSiとの低温反応、そうしてこの結果界面に生じるシリサイド(Siと金属の化合物)の形成についても主として先に述べた後方散乱法を駆使して、勢力的にデータを集積した。筆者は、その当時は知らなかったのであるが、あとで調べてみるとこの時期はシリコン集積回路(IC)技術のスタートに当たっていた。

従って、現在の超LSI時代に導くデバイスのサイズの微小化への研究がその頃盛んに行われ始めていたのである。如何にSi半導体が優れた機能を持ち得るにしても、これを動作せしめる原動力は、金属電極(すなわち、Siと金属との接触)を通しての電流である。

故に、安定で再現性のある電極形成はIC技術の生命線であったのである。

ちなみに、現在の1Mビット・DRAM超LSIの電極部分は1つのチップ(5mm×7mm)当り数百万箇所にあふるのであるから、この技術の重要性は容易に理解されよう。

しかし、当時の技術はシリコンと金属が低温で容易に反応するこの現象の存在を知らなかった。そのため、これに起因する多くのトラブルを極めて不可解で原因不明の難問として困惑していたのであった。そのため、筆者らの論文は前述の如きインパクトを与えたのであった。そうして、これがきっかけとなり現在のシリサイド電極やSPEなど超LSIの重要技術へと発展することになったのであった。

さて、「何故Siは金属と接触するとかくも簡単に反応する(又は融解する)のか?」。もう

少し学問的な表現をとれば、「金属中の自由電子が如何にして接触するSiの共有結合状態に影響しこれを破壊するのか?」という問題の解決が筆者の帰国後のテーマであった。

このテーマの共同研究者は、岩見基弘講師(現岡山大学教授)と大学院の伊藤(現助手)らであった。

このテーマのcomplete understandingは、半導体物理・化学特に、半導体と金属の界面物性学上の意義だけでなく発展途上にあった(超)LSI技術へのcomplete applicationにつながるものであった。そのため、科学研究費や多くの半導体関連企業からの助成金に恵まれるという幸運にありついた。そのため、当研究室にて現有する表・界面分析装置の殆んどを当時に比較的容易に購入・建設することが出来て研究は10年以上にわたり順調に進み、当初のテーマに対する一応の解明を得たのであった。この成果は、Surface Science Reportsや、Japanese Journal of Applied Physics(invited paper)に筆者がReviewしている。

このSi界面研究の更への発展は、伊藤助手により行われている。これが始めに紹介した研究テーマ2の内容である。

伊藤らは既にいくつかの成果を得、特に、多孔質シリコンを用いての研究は、応用物理(学会誌)にて解説として詳説される。

一方、前述のSi/金属界面の研究は、非晶質の研究にも発展した。その緒口は、約10年前京大松原武夫教授の主率する非晶質合金の研究グループに参加する機会を得たことに始まる。その動機は、この界面の電子状態や構造がこのグループの関心を集めたからであった。このグループに阪大・基礎工の浜川教授や電総研の田中氏らも参加していた。自然の成行きとして、彼等のテーマである太陽電池用の非晶質シリコンの研究の手伝いを、主として、筆者らの専門であった界面分析の手法を用いて行うこととなった。

そのうち、石油ショック・エネルギー危機の対策として、通産省でのサンシャイン・プロジェクトが発足し、筆者も浜川教授と共に阪大からの推進委員として年間1千万円近い受託研究

費を長期にわたって受けるという運に恵まれた。これにより、非晶質及び微結晶シリコンの研究を発展させることが出来た。また、共同研究者として、井村助手（現広島大・助教授）が大いに活躍した。

このサンシャインプロジェクト（特に界面の分析）は現在も進行中で、伊藤と川原田の両助手が担当している。

上記研究のうち特に微結晶シリコンに関する研究は現在の研究テーマ1のダイヤモンド薄膜と既述の多孔質シリコンの研究へと発展した。

ダイヤモンドは元来、高温（2000℃）と高圧（6万気圧）下でないと生成出来ないものである。これを、低温（900℃）・低圧（1気圧以下）でしかも、炭化水素（ $\text{CH}_4$ など）から作ろうという試みは、約30年前米国とソ連で行われた。しかし、困難ということでこの研究は中断されたという状態が続いていた。しかし、7年前、無機材質研究所の瀬高（現所長）氏のグループが、 $\text{CH}_4$ を水素（ $\text{H}_2$ ）で強く薄めたガスを用いて気相合成でのダイヤモンド薄膜化に成功した。

その当時、我々はシリコンを水素ガスでスパッタすることにより微結晶シリコン薄膜を作りその物性を調べていた。その過程でシリコンの代りにグラファイトをスパッタすると、ダイヤモンドに近い薄膜が出来ることを見い出していた（よく調べてるとこの膜形成の素プロセスは瀬高氏らのと殆んど同一であるので当然の結果であったのだが……）。

ダイヤモンドは半導体素子として機能化すると、従来の半導体では得られない多くの特長を持ち得る。そこで筆者はこの研究を本研究室のメインテーマにせんとして、Si半導体の研究、特に断層電顕法で若輩ながら大いに評価の高かった川原田を早大より助手として迎えた。彼は着任一年の間に、従来難問とされたダイヤ膜の広面積化を磁場コントロールによるプラズマCVDの方法を開発して成功した。続いてダイヤ膜の青色発光デバイス化への見通しを得るなど彼の学会での評価は極めて高く、近々、米国 Material Research Society (MRS) でこれについての招待講演を行う。

当研究室は、上で述べたように、シリコンと

ダイヤモンドの如く、同一元素による半導体について、電子及びイオンを用いる状態（又は表・界面）分析法に於ては充分の蓄積を有していたのであるが、化合物半導体と光物性については殆んど未経験といった弱点があった。そこで化合物半導体としてII-IV族、しかも、光物性のテクニシャンである田口を電気第4講座の助手より当講座の講師として迎えたのである。田口は、研究テーマ4を受けもって簡易型MOCVDを開発するなど成果をあげている。彼は青色発光素子化を目指しているが、その対象となるII-VI族は本来的にイオン結晶に近い性質（自己補償効果）を有するため多くの困難（特にp, n化）がある（この青色発光が学会での20年来のテーマであることもその難しさを物語っている）。

そこで、より困難の少ない、素性の良いIII-V族半導体での研究からの方が、化合物半導体の理解（又はマスター）には得策ではないかと考えていたところ、また幸運に恵まれた。それは、III-V族、特にGaAsを多面的に徹底的に研究し、これよりの光デバイス化を目標として通産省と日立、東芝、松下などの企業の協同で作られた、光技術共同研究所に日立の中央研究所から室長として迎えられた中島尚男氏が、彼のプロジェクトが終了して本学・産業科学研究所教授として、去年1月より着任されたのである。中島教授に当方の意図をお話しすると快諾を得た。そこで当研究室との強い協力態勢（研究・教育）の下に現在研究テーマ3が進行中である。すなわち、具体的には伊藤助手の多孔質Si上へのGaAsのエピタキシーの研究である。中島教授は東大電気工学科（大学院は電子工学）の出身であり、業績も恩賜賞を受けるなど申し分ない。教授の適切な指導と最新のMBE装置を用いた研究に、春より修士に進む当研究室の学生もその幸運を享受している。

最後に、当研究室の研究方針は常に3本立てで、先づ、研究成果の見通しが充分立つもの、どちらかわからないが研究の体をなして、しかも、どうしても解決したいもの、それから全然新しく全く成功の見通しなどわからぬが強いインパクトが期待できるものを平行して行う

## 生産と技術

ことである。この最後のカテゴリーに属するテーマの探索が研究テーマ5に当る。

たとえば、高温超電導体などはこれに属するであろう。当研究室では伊藤助手、大寺技官らにより、従来の作製法の全然異なり、しかも大量生産に適した方法を開発し、従来の作製温度

900℃前後より300℃も低い600℃にて作製し、マイスナー効果100%の結果を得ている。

以上、研究テーマがどうして設定されたかのいきさつを説明することで研究室の紹介にかえるが、皆々様の強い御支援と御理解をお願い申し上げます。次第である。

