

# 課題研究 - ナノヘテロ半導体の創生 - 原子を並べて新しい半導体を作る -

対象生徒 赤川慎人 大澤由憲 大瀧裕也 長谷川勝康 円山健志  
 指導教官 東北大学附属電気通信研究所助教授 櫻庭政夫  
 指導教諭 笹川民雄

## 1. 講演会について

大学での実験・実習に先だって6月9日の6限にテーマの概要と関係する物理分野の基礎について櫻庭政夫助教授より講演をしていただいた。講演内容は以下の通りである。

### 周期律と半導体の性質

- 属半導体のナノヘテロ構造
- 化学気相成長法による 属半導体のヘテロエピタキシャル成長
- 属半導体の原子層成長制御
- 定量・評価方法
- 表面元素組成比の定着方法
- 表面原子配列の周期性の評価法
- ナノヘテロ構造の結晶構造評価法
- Si結晶表面におけるGe薄膜のテロエピタキシャル成長

半導体にはSiなどの1種類の元素からなる元素半導体(真性半導体)とGaAsなどの化合物半導体(不純物半導体)がある。原子が接近して固体になると、電子軌道が重なり合い、電子のエネルギー準位はバンド(帯)構造をとるようになる。バンドには価電子帯(電子が原子に束縛される状態)と伝導体(電子が自由に固体中を運動できる状態)がある。半導体とはこれらの間のエネルギー差(バンドギャップ)が小さいものであるといえる。不純物半導体では電気を運ぶもの(キャリア)はn型では自由電子、p型ではホールである。

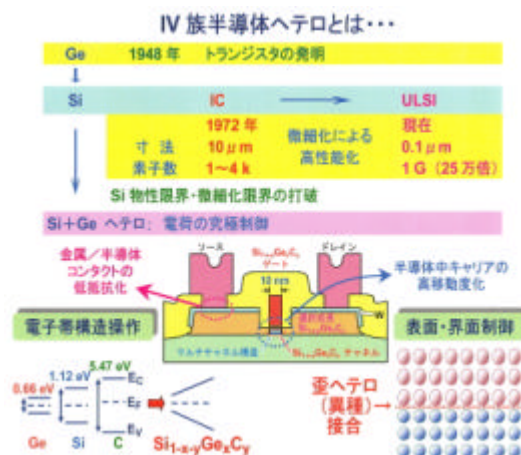
電界効果型トランジスタ(FET)とは、ソースとドレイン間の電流をその間にあるゲートと呼ばれる電極の電圧をかけることにより変化させるものである。現在、Si基板で作られる集積回路では素子数1G(ギガ)で1素子あたり0.10μm程度もの(ULSI)が作られているが、集積率も限界に近づいている。

SiとGeの化合物(Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)をSiの結晶に異種接合してできる半導体(属半導体ヘテロ)を今までの不純物半導体の変わりに使用することで新しいトランジスタ(ヘテロ構造トランジスタ)を作ることができ、集積率や性能を飛躍的に高めることができる。電界効果型トランジスタ(FET)においてSiとSiの間に数ナノmの厚さの(Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)をはさんだ歪みSiGeチャンネルを使用し、ソースとドレインに選択成長SiGeを使用することによりキャリアの移動度が高速になる。また、数ナノmのSiGeをGeではさみ電圧をかけると、SiGeで量子井戸ができ、キャリアの波動性で共鳴トンネル効果が生じ、ある特定の電圧で電流が流れやすくなる現象もみられる。

ヘテロ構造半導体はGeH<sub>4</sub>, SiH<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, PH<sub>4</sub>などの水素化物ガスをSiやGeなどの基板上に、吸着・反応させて作る(化学気相成長法(CVD))。吸着後に水素は水素ガスとなり基盤から脱離し、層状にGe, Si, C, Pなどを堆積させることができる。光照射による加熱や、1原子層で覆われると次の表面反応が進行しないという自己制限的表面反応を利用して一層から数層の原子堆積層が形成される。究極の目標はSi, Ge, C, N, B, Pの原子を一層ごとに形成し、属半導体原子層ヘテロ構造を作り、超高キャリア移動度および超高キャリア密度を実現することである。

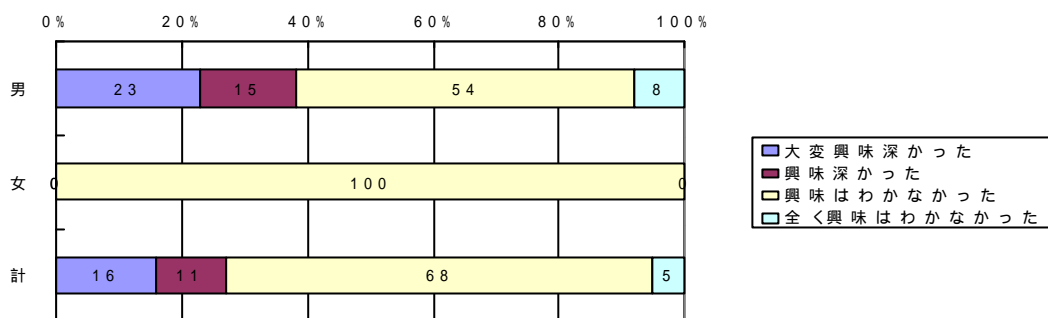


講演会

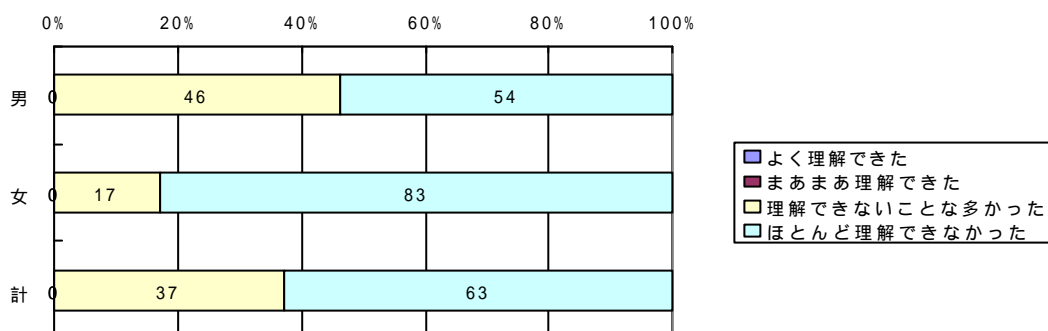


## 生徒のアンケート結果

### 【1】講演を聴いて興味がわきましたか。



### 【2】講演についてどの程度理解できましたか。



### 【3】講演を聴いて半導体についての考え方が変わりましたか。また、感想を書いてください。

- ・原子の並び方で新しい半導体ができることに興味をもった。
- ・携帯電話に 属ヘテロ半導体が使われているのを知り、難しい話も身近に感じた。
- ・講演内容が難しくナノヘテロ構造などよく理解できなかった。
- ・原子を人の手で並べ新しい物質を作ることができるのはすごいことだと思った。
- ・原子には種類が多くあるので半導体もそれだけいろいろな可能性もあると思われる。東北大学へ行くのが楽しみになった。
- ・半導体の機能や性質をいろいろと知ることができ、興味深かった。
- ・用語がたくさん出てきてとても難しかったが内容は充実していた。
- ・究極目標の原子を一層ずつ並べた半導体の開発など夢がある分野であると思った。
- ・興味がある分野だった。ICがどのようなものか分かってよかった。

半導体に関する最先端の内容であり、また、生徒は物理の授業で半導体のしくみや原子物理をまだ学習していなかったため、非常に難しく感じたようである。ほぼ理解できたという生徒はほとんどいなかった。しかし、大変興味深かったという生徒が男子で23%おり、大学での臨地研修のよい動機付けになったと思われる。特に、原子を並べて新しいヘテロ半導体を作れることに興味・関心をもった生徒が多かった。

## 2. 課題研究について

8月23日から27日までの5泊6日の日程で、東北大学附属電気通信研究所ナノスピ実験施設において課題研究を実施した。この施設は3月に完成したばかりで最新の実験装置が多かった。櫻庭政夫助教授はじめ、6名の大学院生の指導のもとで、実験・実習を行った。具体的な実験テーマは「Si基板上へのGe薄膜結晶の成長とその分析評価方法の習得」である。プラズマ処理によって形成されたSi基板上のGeを4種類の実験によってその結晶状態を調べた。無塵服を着て、クリーンルームという特殊な環境での実験であった。また、最新の実験装置で実習がなされ、非常に貴重な体験ができ、生徒も感動した様子であった。実験・実習内容の概要は以下のようである。

### Si基板上へのGe薄膜の生成実験

ECRプラズマCVDという装置でArプラズマによりGeH<sub>4</sub>を活性化し、Si基板上にGe原子をエピタキシャル成長させるというプラズマによる化学的気相成長法の実験である。事前の計画ではこの実習を第1日目に行う予定であったが、装置の調整がうまくいかず実施できなかった。その代わりに、事前に用意さ



ERC プラズマ CVD 装置



装置内のプラズマ

れたプラズマ処理時間が 2.5 分, 5 分, 10 分の Ge 膜厚の異なる 3 つの資料を使い, 膜の結晶状態の評価実験を行った。

#### 評価実験およびデータ解析

以下の評価実験を行い, データを解析した。

##### ・原子間力顕微鏡による表面平坦性評価実験

AMF (原子間力顕微鏡) は数  $\mu\text{m}$  の微細な針で原子間力を一定に保ちながら表面をなぞり, 表面状態計測する装置である。その結果はコンピュータのディスプレイに表示される。処理時間が長い資料ほど Ge 膜厚が増すことが確認された。また, 膜厚が厚くなると面の凹凸も大きくなり, 二乗平均面の粗さ (RMD) が大きくなることが分かった。

##### ・電子線回折による表面原子配列評価実験

RHEED (反射型高速電子線回折装置) を用い, 電子線を Ge 薄膜表面にあて, 電子の物質波の結晶表面原子による回折像をスクリーン上で観察した。Ge の膜厚が厚くなるにしたがって回折像が不鮮明になり, 結晶性が失われることがわかった。特に 10 分間処理した資料は非結晶状態に近かった。

##### ・X 線回折による結晶構造評価実験

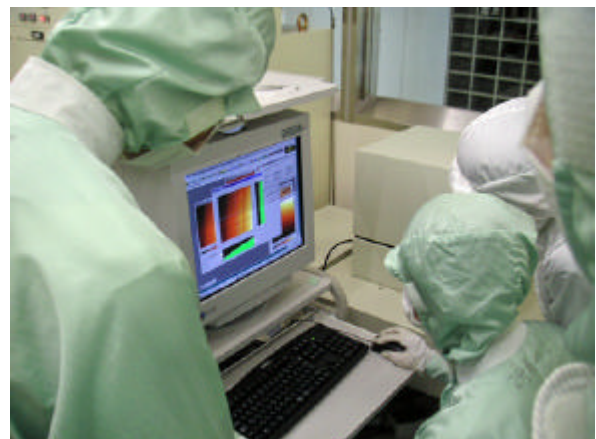
XRD (X 線回折装置) を用い, ブラッグ反射の原理で Ge 薄膜結晶の格子定数を測定した。Ge 薄膜の厚さが増すに従って格子定数が小さくなることがわかった。膜厚が厚くなると Ge のエピタキシャル成長した結晶構造が壊れ, 歪みが緩和し本来の Ge 結晶の格子定数に戻るためであると考えられる。

##### ・X 線光電子分光法による元素組成評価実験

X 線を結晶にあて, 光電効果で原子から放出される電子の運動エネルギーを調べ, 原子の種類と密度を測定する実験装置である。処理時間の長い資料ほど Ar の密度が大きいことが分かった。Ge 薄膜生成に使用した Ar プラズマが Ge 結晶に混入していることが確認された。この混入も Ge の結晶性を下げる原因となっていると考えられる。



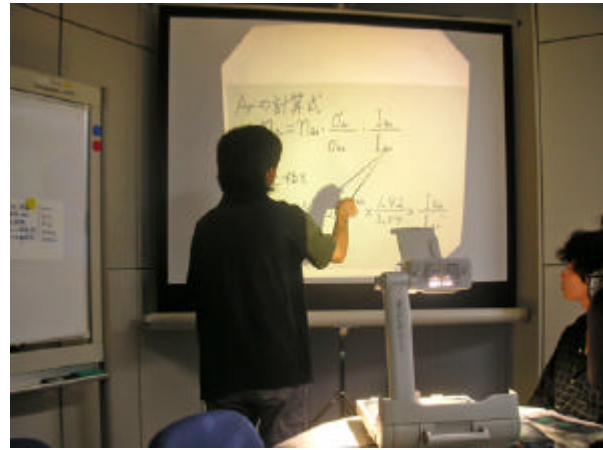
RHEED (反射型電子線回折装置)



AMF(原子間力顕微鏡) の操作



発表用 OHP の作成



報告会

以上の4つの評価実験から、次のような結論が導けた。膜厚が薄い場合は、Si結晶中にGeはSiの格子定数と同じ間隔で成長（エピタキシャル成長）するが、膜厚が厚くなると、しだいにGe本来の格子定数に近づき（結晶の緩和）、最終的にはGe結晶の一部がせり上がり、表面の粗さが増し非結晶化する。また、プラズマCVDによる薄膜生成では、処理時間が長くなるとArプラズマが結晶中に混入し結晶構造を乱す原因となる。

#### 報告会

最終日に今までの実験で解析したデータを分担してOHPにまとめ、報告会を行った。生徒は宿でもその準備に一生懸命に取り組み、本番では緊張しながらも堂々とした態度で発表していた。そこには5日間の研修でひとまわり成長した生徒の姿を見ることができた。その後、反省会があり、大学院生や櫻庭助教授から発表内容や発表の仕方についての細かい注意がなされた。また、最後にこの5日間の実験・実習に取り組んでの感想を生徒と大学院生がお互いに述べ合い、大いに交流を深めることができた。

### 3. 生徒の変容および成果

生徒へのアンケート結果は以下のようである。

- ・5日間という限られた時間ではあったが、とても貴重な体験ができた。オープンキャンパスと違い、実際に最新の研究施設で最先端の実験を体験することができ感激した。また、院生の人たちと直接話をすることができたのが大変良かった。
- ・半導体の構造やしぐみ、その性能などが理解できるようになった。また、1つのテーマについて研究してそれをまとめ、その成果を発表することの難しさがわかった。
- ・今までは1つのテーマを調べたり、考察したりすることがなかったが、1つのことを様々に考察することでいろいろ科学的考え方ができるようになった。
- ・人前での発表が堂々とできるようになった。
- ・家電製品やコンピュータで使われる半導体もシリコン基板をいろいろと工夫して作っていることが分かった。この技術はわれわれのまわりで重要な役割を果たしていることを再認識した。新しいナノ半導体の創生はとても興味深く、将来自分でも研究してみたいと思った。
- ・大学の先生や院生がとても親切で良い雰囲気の実習できた。
- ・研究所で実験させてもらい、具体的に大学での研究というものがどういうものかわかるようになった。
- ・装置が最先端でコンピュータ制御が多く、実際に自分たちで実験する場面が少なかったのが残念だった。

生徒はこの5日間の実習で最先端の実験装置に触れ、また、第一線の研究者や院生の指導を直接受けることができ、たいへん貴重な経験をし、多くのことを学ぶことができた。また、この臨地研修後、学習意欲が格段に高まった生徒も多く見られた。今回の実習は高校での学習活動や生徒の進路選択に良い影響を及ぼす大変有意義な研修であったといえる。5日間という長期にわたり、合宿生活のように共通の研究に集中できたことは生徒にとって大きな思い出になったと思われる。

### 4. 大学の評価・感想

課題研究全体を通して

このような試みは、実験の準備から実験結果を他人に報告する所までの一連の作業を自らの手で行う体験

をする重要な機会を与えている。担当の教員の苦勞は大変なものと思うが、科学に限らず、すべての教科において学習意欲の向上が期待できると思うので、効率的な実施形態を模索しながら積極的に取り組むべき試みだと考える。

十分な基礎知識がない高校生に対し、今回のような大学で課題研究を行うことについて

授業で知識として教えられることが実際の現場で活用されるプロセスを擬似的に体験することによって、その後の学習意欲が格段に高まるものと期待できる。また、難しいことでも基本となる原理の多くは極めて単純であることを知って欲しい。高校生には多少難しいことであっても、あえてレベルを落とすことなく、そのままの形で体験してもらうことに意味がある。だから、教員から高校生に対しても、難しいことに積極的に挑戦するように励ましていくことが重要である。

受け入れに関する問題点

大学の一つの研究室で短期研修する場合、受け入れられる人数は1回に5人程度までが限界である。学内でも似たような短期研修があるので1年に1回が限界である。当研究室の場合は、3日以上滞在しないと訪問する価値は半減する。受け入れは研究室にとっても負担は大きい、これも研究室の役割のうちであると認識している。クラス単位や学年全体で考える場合、旅費・滞在費がかさむ問題があるので、地元の大学との連携がより重要になってくる。

受け入れる研究室でのメリット

自ら考える習慣のある学生が増えて、そういう学生が自分の研究室を志望してくれることが、大学教員としての最大の望みである。直接指導した大学院生も、素朴な疑問に対して率直に答えることの重要性に気づく貴重な機会を得て人間的に成長している気がする。

高校生を指導しての感想

当研究室に短期研修に来た生徒に感想を聞くと、「ごく一部は理解できた気がするけど、わからないことがほとんど」と答えることが多い。今回も同じであった。世の中にはまだわかっていない領域がたくさんあり、それを明らかにするために研究するのである、ということさえわかれば、それだけでも来てもらった価値がある。わからないことをわからないと正直に認める謙虚さを忘れないで欲しい。それこそが向上心の現れであると同時に、研究のスタートラインである。

このような課題研究を高校のカリキュラムに取り入れることについて

人間は、専門家の話を聞きすぎると固定観念にとらわれることがある。固定観念があることで、新しい発見を見逃すことが少なくない。このような固定観念が形成されてしまう前の高校時代にこそ、大学の研究活動の一端に触れる機会を与えるべきである。

## 5. 今後の課題

大学と連携し課題研究を行うことは、最先端の研究を生徒が経験できるという点で優れたものであるといえる。今回の内容は原子物理の分野であったので、事前に高校で補講をして臨んだが、高校2年の生徒にとってかなりハイレベルな内容であった。今回はこのことが生徒の知的好奇心を刺激する効果を生んだともいえる。一般には大学と連携する場合でも、課題研究のテーマの選定については無理のない内容にすることも大切であると思われる。また、生徒自身が製作したり、実験したりする場面を増やし、生徒に創意工夫させる要素が多く加われば、さらに改善されていくと思われる。

<謝辞>

お忙しい中、長期の臨地研修をこころよく引き受け、温かく指導をしていただいた東北大学電気通信研究所ナノヘテロプロセス研究部 室田淳一教授 櫻庭政夫助教授ならびに大学院生の方々に深く感謝申し上げます。