

## CERN 夏の学校

名古屋大学大学院 理学研究科

廣瀬 茂輝

shigeki@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

2011年10月28日

私は7月5日(火)～9月9日(金)までの10週間、CERN夏の学校に参加しました。このプログラムの参加者は、割り当てられた指導教官に指導を受けながら、CERNで約10週間の研究を行います。私はISOLDE(Isotope Separator OnLine DEtector)の固体物理グループの研究者であるKarl Johnstonの下で、拡散チェンバーおよびPL(Photo Luminescence)分光測定を行いました(図1参照)。この期間中に行った研究や生活の様子などをここで報告します。



図1 ISOLDE 実験ホール

## 1 研究

### 1.1 ISOLDE について

ISOLDEは、PSB(Proton Synchrotron Booster)で加速された1～1.4GeVの陽子をターゲットに衝突させ、核反応により生成されたRIをマグネット(セパレータ)で質量別に分け、純粋なRIビームとして各実験に供給する施設です。ここで作ることができるRIは70元素700種類に上ります。より詳しい説明については、ISOLDEのウェブサイト<http://isolde.web.cern.ch/isolde/>などを参照して下さい。

### 1.2 拡散チェンバー

拡散チェンバーとは、半導体サンプルへのRIのドーブ<sup>1</sup>、アニーリング、 $\gamma$ 線検出までをすべてチェンバー内で行い<sup>2</sup>、これまで実験に数時間以上かかっていた時間を約10分程度に短縮することを目指すチェンバーです(図2参照)。実験

<sup>1</sup> RIはISOLDEでRIビームを使います。

<sup>2</sup> スパッタリングしたドーパントをアニーリングにより拡散させたサンプルに対して、数百nmオーダー厚の層ごとにRIの $\gamma$ 線を検出することで各層の濃度を推定し、原子の拡散を観察します。

時間が短縮できれば、それは則ち半減期の短いRIも利用できるようになり、この種の測定に使えるドーパントの種類を増やすことができます(図3参照)。



図2 拡散チェンバー

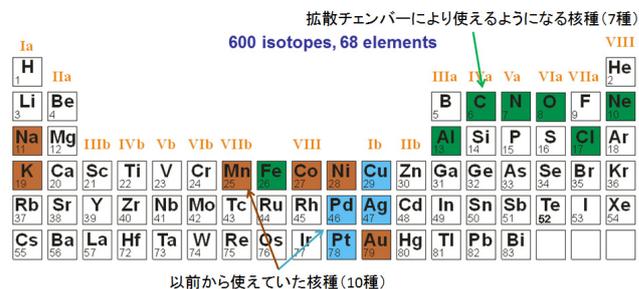


図3 マスに色が塗られている元素が拡散チェンバーで利用可能。特に緑色の元素(印刷された会誌では濃い灰色の元素の一部:C, N, O, Ne, Al, Cl, Fe)は新たに使えるようになるものを表す。

私がCERNに着いた時点では、このチェンバーはドイツでオフラインでの動作テストが行われた後、CERNに送られてきたところでした。このチェンバーのビームラインへの取り付け、動作テストを行い、マニュアルを作ることが今回の私の仕事になりました。これ自体は実験というよりは“作業”に近いものでしたが、実際にビームラインに部品を取り付け、排気をし...という作業が初めてでしたので、非常に良い経験になりました。その後各パーツの動作確認をしながらチェンバーの動きを理解し、マニュアルを作成しました。

予定では最後のまとめとして実際にRIビームを使ったビームテストをするはずでしたが、その当日にISOLDEのセパレータに問題が発生し、急遽ビームタイムが優先度の高い実験に割り当てられてしまったため、とても残念なこ

とにこれは中止となってしまいました(その後、ビームテストは私の帰国後に行われ、無事に正常動作が確認できたとのことでした)。

### 1.3 PL 分光測定

PLとは、半導体内の自由電子がバンドギャップエネルギーよりも高い光の照射を受けたとき、価電子帯に落ちるときに光を放射するために半導体が発光する現象のことです。この放射光のスペクトラムを測定することで、バンドギャップ内にどのようなエネルギー準位が存在するかを調べることができます。今回使用した測定装置の概略を図4に示しました。電子の励起には HeCd レーザー(波長  $325\text{nm} = 3.8\text{eV}$ )を使い、電子の熱運動による影響を抑えるためにサンプルを液体 He で  $4\text{K}$  に冷却します。

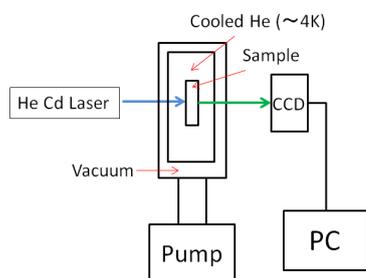


図4 PL 分光測定装置概略

今回は純粋な ZnO サンプルと Mg をドーピングした P 型 GaN 半導体 (GaN:Mg), Zn をドーピングした N 型 GaN 半導体 (GaN:Zn) のサンプルを使い、それぞれのスペクトラムを比較しました。ZnO や GaN は青色発光デバイスに用いられているもので、青色領域にバンドギャップエネルギーを持っています。ですが ZnO は酸素の電気陰性度の高さのために P 型半導体作りが難しいという欠点があり、良品率は 30% 程度でしかありません。一方でレアメタルを使わない ZnO は安価であるというメリットを持つため、この問題を結晶構造レベルで理解し、最終的にはより良品率の高い製造方法を探りたいというモチベーションが背景にあります。

今回は 3 種類のうち GaN:Zn は発光強度が弱く発光が検出できませんでしたので(アニリング前のサンプルであったため、ドーピング時の格子欠陥が多かったためであると考えられます)、ZnO と GaN:Mg の 2 種類のスペクトラムを比較しました。

測定データを図5・図6に載せました。図5は広いレンジ(波長  $150\text{nm}$  分を 2048 点で測定)でのデータで、一目見てわかるように、GaN:Mg サンプルには低エネルギー領域に幅の広いピークが現れています。これは深い準位により形成されるものと推定できます。また図6は狭いレンジ(波長  $20\text{nm}$  分を 2048 点で測定)でバンドエッジ付近を見たものです。これを見ると、両者のバンドエッジは  $3.2\text{eV}$  でほぼ一致していることに気づきます。常温での GaN のバンド

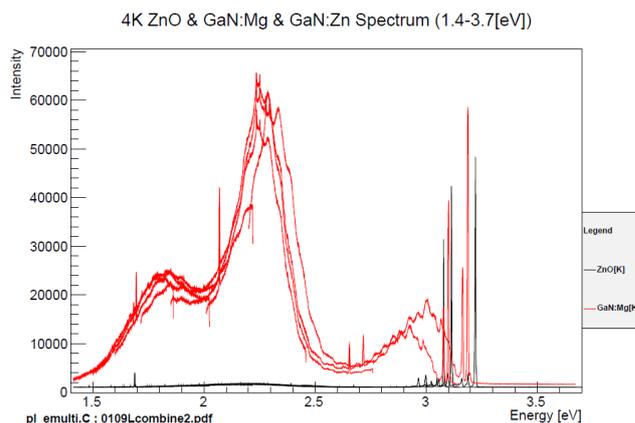


図5 PL 分光測定結果(低分解能)

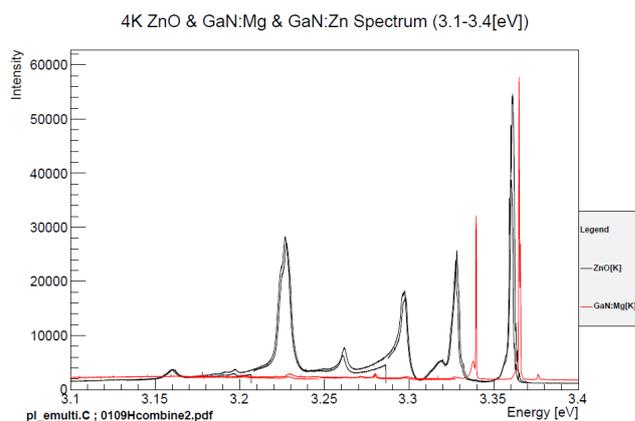


図6 PL 分光測定結果(高分解能)<sup>3</sup>

ば一致していることに気づきます。常温での GaN のバンドギャップエネルギーは  $3.4\text{eV}$  であることが知られており、低温でバンドギャップの幅が狭くなっていることがわかります。また ZnO のみ、バンドエッジよりも左側に等間隔にいくつかのピークが見えています。これは自由電子が価電子帯に遷移する際にエネルギーの一部を格子振動として放出するために、放射のエネルギーが飛び飛びの値で低くなっているのが見えているものです。格子振動は原子間の結合が強いほど起きやすいので、ZnO の方が強く結合しているということがわかります。

PL 分光測定からわかることは“どのようなエネルギー準位があるのか”という統計的情報のみで、具体的に“なぜそのエネルギー準位が形成されるのか?”、“どの原子同士がどのような結合をしているのか?”という問題は、摂動角相関測定やメスパワー分光測定などを利用し、それぞれの結果を合わせながら結晶構造を解析することになります。

今回 CERN で行った研究は、素粒子物理から離れた“固体物理”という私にとっては未知のものでした。そのためわからないことがとても多く苦労しましたし、正直なところ十分に深く掘り下げられなかった部分も多々ありました。

<sup>3</sup> データの線が何重かにずれて見えています。これは分光のために使った反射型回折格子の表面精度があまり良くなかったためです。

一方で、知らないことが多いゆえに指導教官などと積極的に議論することにつながったとも思います。CERN で未知の分野に挑んだ経験は、自分にとって大きな経験でした。

## 2 その他のプログラム

CERN 夏の学校では、研究以外にも講義(図7参照)・施設見学・ポスターセッション・スチューデントセッションなど、様々な行事が用意されています。施設見学では、私は LINAC・LEIR・計算機室の見学と CMS の見学に参加しました。ATLAS 以外の加速器についてはたまに話を聞く程度で具体的にどのようなものなのかよくわかっていなかったもので、実物を見ることができて非常に有意義でした。



図7 講義の様子

## 3 CERN での生活

夏の学校には非常に多くの国から学生が参加しており、友人たちとの会話の中で他国の文化を感じられたし、英会話に対する自分の中にあった敷居がほぼ取り払われました。

CERN ではホステルの2人部屋に宿泊し、ルームメイトの Rene とはかなり仲良くなりました(図8参照)。Rene とは毎晩今日は何をしたとか他愛もない話をし、おかげで以前に比べてかなり英語が話せるようになったと思います。Rene にも、滞在終わりの頃には「大分英語が上手くなったね!」と褒められました。

夏の学校生には日本のアニメ好きが案外いて、Carlos などとはそこから仲良くなりました。

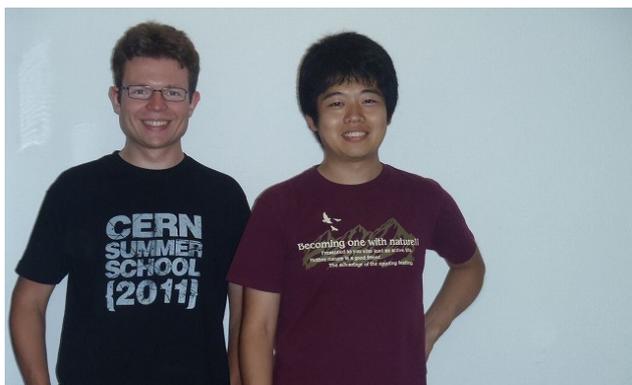


図8 ルームメイトの Rene と

土日は、時には友人たちと、時には一人でよくジュネーブの市街地に行きました。レマン湖畔から旧市街地、郊外まで一通り歩いた気がします。私は中学生の時以来弓道をやっているのですが、なんとジュネーブにも弓道場があり、一度訪ねたりもしました。

また、スイスは内陸国という立地と発達した鉄道網を利用して、様々な国に気軽に旅行に行けます。私は国外ではパリ、ローマ(図9参照)に、国内ではベルン、ローザンヌに行き、有名な観光地はもちろん、ツアー旅行では見逃してしまいそうな朝市や日常の街の光景を目にすることができました。ローマではちょっと油断をして危ない目に遭いそうになったり、日本やスイスほど親切ではない交通機関のために帰りの飛行機にあわや乗り遅れ...などということもあったが、そういうことも含めて良い経験になりました。



図9 ローマのサンタンジェロ城。西暦139年に完成!

## 4 CERN での経験を生かすこと

最高の10週間を過ごした後、9月12日に私は日本に帰国しました。私に課せられた次なる課題は、「いかにCERNでの経験を今後の研究に生かすか」だと思います。CERNで行った研究の中で学んだことももちろんですが、CERNで外国人研究者や学生と一緒に研究しなければわからなかったことや感じられなかったことが多くありました。色々ある中で例を挙げるなら、英語で苦労したということがあります。最初は「知っている英語を駆使すればコミュニケーションは何とかなる」と思っていましたし、実際に意思疎通ができず困ったことはあまりありませんでした。しかし研究の中で「議論をする」となると案外大変で、知っている英語をたどっているうちに段々と話に定量性が欠けていった、ということがよくありました。

そういった、CERNに行かなければわからなかったことや感じるができなかったことを、しっかり今後の研究に生かしていきたいと思っています。

最後になりますが、このプログラムへの参加にあたり、非常に多くの方々のお力添えを頂きました。お陰で、とても充実した10週間を過ごすことができました。この場を借りてお礼を申し上げます。