

## 1. 事前計画

MERIT 長期海外派遣として 9 月 16 日から 10 月 15 日までの 1 ヶ月間、オランダのデルフト工科大学の Lieven Mark Koenraad Vandersypen 教授の指導の下で研究を行った。Vandersypen 教授の研究グループでは、これまでに半導体量子ドットを線形に配列させた多重量子ドットの形成とそこで観測される電子相関現象について先駆的な研究を行っており、同分野の研究室の中でも最先端の研究室であるといえ、その先駆的な研究内容を見込まれ、同研究グループは 2015 年に Intel と 10 年間の共同研究を始め今後より一層の先進的な研究が見込まれる研究室の一つである。



図 1: デルフト工科大学応用物理学科

一方で私が所属する樽茶研究室でも同様に多重量子ドットを用い、主にスピン量子ビットとしての応用に積極的に取り組んでいる研究室であり、同系統の試料では最高の 99.97% の確実度の 1 ビット操作を実現するなどの成果を挙げている。このように同系統の試料を用いながら強みの異なった研究室どうしではあるが、現在私は多重量子ドットをさらに拡張し、その計においてスピン量子ビットを実現することに取り組んでおり、ここにおいては樽茶研究室で培われたスピン量子ビットの高度な操作技術と Vandersypen 研究室で培われている多重ドットの形成及び自動制御の技術を組み合わせることが非常に有用であると考えられる。そのことから今回の海外派遣では Vandersypen 研における実験技法や実験データの解析手法について学ぶことが主な目的である。

樽茶教授の承諾を得た後、Vandersypen 教授が所属研究室を訪れる機会があり、そこでデルフト工科大学での大まかな研究計画を決めた。そこでは多重量子ドットの自動調整のグループに加わって研究することを決め、また後に Vandersypen 研の PhD 学生である Sjaak van Diepen とともに研究をすることとなった。

## 2. 実施内容

第 1 週は Vandersypen グループの行っている各研究について担当者からの説明を聞いた。主だったグループとして多重量子ドットの自動調整、2 次元配列の量子ドット、シリコン基盤を用いた量子ドット、超伝導回路と量子ドットを組み合わせた系などがあり、その中でも多重量子ドットの自動調整のチームとは、事前から興味があったこともありより詳しく話を聞くことができた。現在そのグループではこれまで主導で行われてきていた各種パラメータ(量子ドット内の電子数やドット間の結合など)の自動調整に取り組んでおり、すでに単一お

よび二重量子ドットの自動形成技術及び仮想ゲート(Virtual gate)という各ゲート電極の各ドットへの影響を補償して各ドットの化学ポテンシャル及びドット間結合のみを操作する技法を確立していた。それを踏まえて現在はドット間結合の自動調整および仮想ゲートを形成するための手法開発を行っていた。

これらの現状を踏まえて自分は、多重量子ドットにおいてすでにできている多重量子ドット列にもう一つ新たな量子ドットを加える手法について取り組んだ。現状として量子ドット下形成されていない状態から単一・二重量子ドットを形成する方法は確立されているものの、それに新たに量子ドットを加える方法については確立されていなかった。そこで多重量子ドットに取り組んでいる研究者とともに拡張性のある手法をディスカッションした結果、Virtual gateを用いて、すでに形成されている二重量子ドットの状態を保ったまま3つ目のドットを形成するゲート電極に電圧を印加し3つ目の量子ドットを形成するという手法を考案した。この手法は2重から3重量子ドットを形成する場合だけでなく、任意のn重量子ドットに新たなドットを加えてn+1重量子ドットを形成することもできるなど系の拡張性に配慮した手法である。

この手法の自動化を目標に数値計算で再現された電荷安定状態図を用いてプログラムの作成を期間中に行った。それに際して、Vandersypen 研ではプログラムの専門家が常駐しているのに加え、グループ内で書かれたプログラムの共有の仕組みが確立されており、プログラムを作成する上での支援体制の充実ぶりが強く感じられた。

まず初めに数値計算によって再現された仮想量子ドットにおいて電荷遷移線の検出プログラムを構築し、上記手法を確かめた。仮想量子ドットでは電圧の変化によるゲート電極-量子ドット間の静電結合の変化などがおきず、また予期せぬ場所に量子ドットが形成される寄生ドットなどもないためプログラムは巧く働いた。これを踏まえて実際に2重量子ドットが形成されている試料において同手法を試してみたところ、上記寄生ドットの存在などもあり電荷遷移線の検出及び判別において改善の必要が生じた。その後、検出された電荷遷移線をその傾きや位置などからある程度判別するプログラムの作成をし、実際に試料で測定されたデータにおいて不完全ながら電荷遷移線の判別を行うことができた。本来はこれらの工程を自動化し、形成された三重量子ドットにおいて Virtual gate を構築するまでが目標であったものの、途中で帰国することとなった。

今後の展望としては所属研究室において Virtual gate の手法を用いるため TU Delft で用いられていたものを参考に Virtual gate を構築するプログラムの作成し、またそれを用いて現在の自分の研究テーマである多重量子ドットでの電子スピン操作を行うことが考えられる。多重量子ドットではゲート電極と量子ドット間の静電結合によって操作が複雑化していくことがわかっており、目的のパラメータのみを変調できる Virtual gate は今後多重量子ドットにおいて必要不可欠となる技術と考えられる。

### 3.謝辞

まず初めに、この海外派遣を行うきっかけを与えてくださった MERIT 及び MERIT 事務局の方々に感謝します。受け入れ先を紹介してくださった樽茶先生、大変忙しい中私を受け入れてくださり、貴重な機会を提供してくださった Lieven Mark Koenraad Vandersypen 先生、一緒に研究させていただいた技術職員の Pieter Eedebak さん、博士研究員の Christian Volk さん、大学院生の Sjaalk van Diepen さん、Anne-Marije Zwerver さん

Vandersypen グループのメンバーには心よりお礼を申し上げます。