

<計画研究代表 自己紹介>

研究項目 A02:計画研究エ

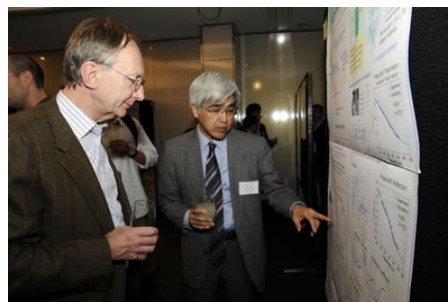
「周期構造を利用した光メタマテリアルの作製と物理」

石原 照也(東北大学)

計画研究(エ)の代表を務めております石原です。私も萩行先生に倣って、これまでの研究遍歴を振り返り、どのようにメタマテリアルにたどり着いたかを書くことで自己紹介にかえさせていただきたいと思っております。

私は1981年に4年生として東大物理の長澤信方先生の研究室に入り研究を開始しました。研究室のテーマはレーザを用いた光物性でしたが、当時、研究室では全員が塩化第一銅(CuCl)を研究するなか、ひとりヨウ化第二水銀(HgI_2)をテーマとしていただいたことが、構造の違いによる物性の違いを意識する出発になったような気がします。

縁あって、学位を取得する前に東北大物理の後藤武生先生の助手にさせていただき、後藤先生が手がけておられた PbI_2 も研究対象に加えながら、励起子・励起子分子系の3次の光学非線形性の起源を議論する内容で学位を東北大で取得しました。私が学位論文をまとめている頃、半導体量子井戸の研究が盛んになり始めましたが、自分の研究対象である層状化合物は、異方性はあっても、電子のバンド構造は3次元的であり、量子井戸のような低次元性は生じません。 PbI_2 の層間に有機分子を挿入(インターカレーション)することなども試みましたが、結晶構造が破壊され白濁してしまっていて、うまくいきませんでした。そんな折、ふとしたきっかけで、 PbI_2 に最初からインターカレーションしたような構造をもつ、無機有機複合化合物($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NH}_3$) $_2\text{PbI}_4$ に出会いました。この物質は当時構造相転移の観点から研究が行われていましたが、私はそれを量子井戸の励起子という観点から見直し、いくつかの興味深い結果を得ました。一つは長い有機分子イオンと短い有機分子イオンを組み合わせることによって、電子構造を3次元、2次元、1次元、0次元と自在にコントロールできることです。もう一つはこの系における異常に大きな励起子束縛エネルギーです。半導体の励起子束縛エネルギーは通常室温の熱エネルギー(26meV)より有意に小さく、室温では励起子が観測されないのが普通です。ところがこのタイプの物質では励起子が200-300meVもの大きな束縛エネルギーを持ち、室温でも安定です。



Pendry 教授に説明 (PECSVIIIにて)



これは無機層内に閉じ込められている電子と正孔のクーロン相互作用が、誘電率をはるかに小さい有機層を通して、遮蔽されずに起こるため、強く束縛されるといふ事情によるもので、誘電率閉じ込め効果と呼ばれています。このような経験を通じて、化学的なセンスで行われる通常の物質設計とは一線を画した、物理的な物質設計の面白さに目覚めることになりました。

この研究を契機に、JST の量子波プロジェクトを始められた東大生産研の榊裕之先生に誘っていただいて、アメリカで開かれた変調半導体に関する国際会議に参加し、人工的な半導体構造を設計してその光物性や電気輸送特性を研究するという研究分野を知り、翌年から 2 年間 Brown 大学の Nurmikko 教授の研究室に滞在することとなりました。そこでは無機有機複合化合物の励起子物性の研究を進展させると同時に、ZnSe 系量子井戸青色半導体レーザの開発研究にも部分的に携わりました。私の滞在中に 3M 社が電流注入のレーザ発振を発表したため、Nurmikko 研究室は臨戦態勢となり、ほどなく発振を成功させたことを目の当たりにしたのは、大変貴重な経験となりました。またこの滞在中に Brown 大のコロキウムで、当時 Bellcore にいた Yablonovitch 博士のフォトニック結晶についての講演を聞いたことも大きな収穫でした。人工的な周期構造で光学的な性質が大きく変わることに大変感銘を受け、Nurmikko 教授に談判して、手始めに ZnCdSe 量子井戸と周期構造を組み合わせるプロジェクトをはじめ、光励起で分布帰還型レーザを発振させました。

日本に帰国して 1 年あまりで、広島大学工学部電気系の山西正道先生に助教として呼んでいただきました。山西先生は主に GaAs 量子井戸を舞台として、電場印加による電子状態の制御を利用して、新奇デバイスを考案するとともに、量子光学的な実験もなさっておられ、大変刺激をうけました。広島大学の集積化システム研究センターには最先端の微細加工装置があり、これまでの経験を活かして、新しい方向に展開することを考えました。それが石英基板に電子線リソグラフィで周期的な溝をほり、そこに無機有機複合半導体の有機溶液をスピコートして、半導体の周期構造を形成する手法です。通常のフォトニック結晶の材料は透明物質であり、周期構造のみが光学的性質を決めますが、この系では室温でも励起子効果が顕著な物質がつかわれているため、励起子と周期構造のフォトンの強結合状態（ポラリトン）が形成されます。これはポラリトニック結晶と呼ぶことができ、1998 年に論文になっていますが、現在盛んに研究されている金属周期構造（プラズモニック結晶）の先駆的なものといえるかもしれません。

1999 年から理化学研究所のフロンティア研究システムに移り、時空間機能材



料研究グループ励起子工学研究チームとして研究を行いました。理研では外国人を招くことが容易であったため、以前から交流のあったロシア一般物理学研究所の Sergei Tikhodeev 教授と連携を深め、彼の研究室の若手の研究者に理研に滞在してもらい、共同研究を進めました。そのなかで、ポラリトン結晶やプラズモニック結晶の光応答を計算するための計算コードを開発し、人工構造の光応答、近接場分布、内部電磁場分布などが自在に計算できるようになりました。研究員の Luo 君と始めた表面プラズモンの近接場を利用したサブ波長微細加工は光領域のメタマテリアル作製に役立つ可能性があり、今回の新学術領域の主要テーマの一つとして取り組むつもりです。また、ポラリトニック結晶の第二高調波生成の研究は、プラズモニック結晶の光整流の研究に発展しました。光整流の解釈については、まだ未解決の部分がありますが、電磁場応答の計算と種々の構造についての実験との比較によって、早晚決着がつくことを期待しています。

2003年からは東北大物理で光物性物理学研究グループを率い、学生とともに、金属フォトニック結晶やメタマテリアルに焦点を絞り、研究を行っています。2007年までは理研と兼任であったため、こちらの施設で微細加工試料を作製していましたが、現在は東北大の内部のいくつかの装置をお借りして作製を行っています。幸い今回の研究費でスパッタ製膜装置を導入することができましたので、これを利用して多くの新奇構造にチャレンジしたいと思っています。私の研究の中で、試料を自分で作製するという事は大きな意味を持っています。世界初の新奇な物理効果を自分の設計と作製、測定で見出し、その効果の原理を実証するために、設計を変えてゆく。こうしたアプローチがメタマテリアル研究の面白さだと思っています。

メタマテリアルのもうひとつの面白さは電子回路的なものの考え方です。私は小中学生のころアマチュア無線を聞くための短波ラジオ（真空管式！）の製作に夢中でした。もちろん電子回路の理解は「子供の科学」以上ものではありませんでしたが、大学で物理を学び、研究者としてさまざまな化合物を経てメタマテリアルという研究対象に出会った今、昔の恋人の面影をみているというのはあながち誇張ではありません。「電子回路の物質化」というのは、採択されなかったかつての申請書類のキャッチフレーズですが、少なくとも自分の意識としてはこれを念頭において、新しい観点の光物性の研究を続けてゆきたいと思っています。