

2017年5月
University of California, Berkeley
Department of Mechanical Engineering
PhD candidate 畠山大輝

留学報告書

University of California, Berkeley で光半導体について研究している畠山です。本報告書では、学会発表と研究内容について報告したいと思います。

1. 学会発表について

今年の4月に2017 Materials Research Society (MRS) Spring Meeting で口頭発表を行いました。MRSは40年以上前にアメリカで設立された材料系の学会で、会員数は16,000人、90カ国の研究者が登録しています。MRSは毎年春と秋にミーティングを開催しており、毎年春はPhoenix（以前はSan Francisco）、秋はBostonで行われています(図1)。アメリカで設立された学会ではありますが、会員の半数はアメリカ国外の研究者であり、ミーティングも世界各国から研究者が出席しています。

材料といいましても多岐にわたります。電子材料や磁気材料、バッテリーのようなエネルギー系の材料もありますし、カーボンナノチューブのようなナノマテリアルの発表もあります。ソフトマテリアルやバイオマテリアルの発表もあります。材料の種類も様々ですし、材料の理論、モデリング、作製法、評価法というように、材料の扱い方にも色々な側面があります。

私は光学材料の中でもプラズモニック材料、メタマテリアルのシンポジウムで発表をしてきました。私の主な研究分野はプラズモンやメタマテリアルを使わない誘電体の導波路なのですが、一部のプロジェクトでプラズモン構造を使



図1 MRS会場のPhoenix Convention Center

っているため、MRS で発表することにしました。私の参加したシンポジウム「Materials Platforms for Plasmonics and Metamaterials」には「Novel Approaches Towards Practical Applications」という副題がついていました。これはそろそろメタマテリアルも実用的な材料として考えていかないといけないというチェアの願いなのか、それとも APS（アメリカ物理学会）のような物理に特化した学会との差別化を図るためのものなのか定かではありませんが、MRS らしくてとてもいいなと個人的に感じた次第です。

私の発表のタイトルは「Bimodal Phase-Matching in Nonlinear Photonic-Plasmonic Waveguides」ということで、導波路中における非線形効果の位相整合について発表を行いました。具体的にどのようなことをやっているかは次の章で説明したいと思いますが、「プラズモン構造と光導波路を利用して第二高調波発生を効率的に行った」というのが発表の要点です（詳細は後述します）。プラズモニクスの中でも若干変わった発表だったので、スライドの準備に苦戦しました。発表時間が短い中で自分の主張を簡潔にわかりやすく説明するために、できるだけシンプルな図を作り、先輩たちの前で発表してアドバイスを貰って改善してきました。その甲斐あってか、Plasmonics Symposium のスポンサーである Wiley から賞を頂くことができました。図 2 の写真はプロジェクターで顔が青くなっていたので白黒に変換しています。



図 2 シンポジウムの最後にあった授賞式（Wiley 賞）

シンポジウムの感想としては、やはり流行り廃りがあるなと思いました。今の流行りは誘電体と metasurface(もしくは metalens)でしょうか。私のように金属を使うと非線形効果も得られますが金属のロスが無視できなくなるので Figure of Merit(非線形性/吸収)はそれほど高くなりません。そういう意味では誘電体に注目が行くのも仕方ないかなと思いますし、もっと早く成果を出して発表しておけばよかったなという気がしています。

MRS 全体の感想としては、TMDC (遷移金属カルコゲナイド) や h-BN (六方晶窒化ホウ素) といった二次元材料がいたるところで研究されているなという印象が強かったです。ただ、TMDC の面白さはもっと基礎的な物理にあると思うので、APS (アメリカ物理学会) で発表せずに MRS で発表する意図は何なのだろうかと考えてしまいます。成長法や評価法の研究であれば MRS で良いのかもしれませんが、エキシトンやバレートロニクスについて MRS で発表しても出席者が嬉しいのか気になるところではあります。そういう意味では自分の導波路とプラズモン構造の発表も CLEO(レーザーと電気光学の学会)のような導波路や位相整合をよくやる人の前で発表すべきだったのかもしれませんが。

ちなみに MRS は、San Francisco で毎年春に行われていたのですが、去年から場所が Phoenix に変わってしまいました。Phoenix だと直行便はアメリカ国内しかないの、海外から参加する研究者は不便になってしまったかもしれません。発表後に Tucson の University of Arizona を訪問しました(図 3)。4 月なのに 30°C 超でとてつもなく乾燥しており、こんな過酷な環境で研究している種田君は凄いなあと思うばかりでありました。種田君には旨いメキシカンをごちそうになりました。メキシカンも絶品でしたが、Sonoran Dog というふかふかのパンに包まれていて豆とサルサが載ったホットドッグがおいしかったので Tucson か Phoenix に行った際は是非。図 3 にもありますが、Tucson の砂漠地帯にはサボテンが無数にありました。サボテン好きにはおすすめです。



図 3 (左)University of Arizona (右)Tucson の砂漠地帯

2. 研究について

前述の MRS で発表した内容について少しだけ触れたいと思います。私の研究テーマは非線形光学です。非線形光学がどのようなものか、簡単に説明するために図を用意しました。例えば図 4a のように、ある物質に左から光を当てるとします。すると右から出てくる光は最初の光と同じ波長 λ をもつのが一般的です。しかし、図 4b のように特殊な材料を用いると、波長 λ の光しか入れてないのに波長 λ , $\lambda/2$ というように、元々の光の半分の波長の光が出てくる事がまれにあります（周波数で言うと 2 倍の周波数の光が出てきます）。このような現象のことを非線形散乱と言います。特に半分の波長の光が出てくる時は第二高調波発生、 $1/3$ の波長の光が出てくる時は第三高調波発生と言います(図 4c)。このような現象を式に表すと、非線形分極 P の強さは

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots$$

となります。ここで、 E は電場の強さ、 χ は電気感受率を表します。最初の項のみの場合は P が E に比例するという線形な関係であり、図 4a のように λ の波長の光しか出てきません。ただし、2 つ目の項も含まれると P が E と E^2 で表されるため非線形な関係になります。このような関係の時は図 4b のように半分の波長の光（2 倍の周波数の光）も出てきます(2 項目が $\lambda/2$ で表現されるため)。なぜ 2 項目が 2 倍の周波数になるかという、例えば $E = \cos \omega t$ とした時に $E^2 = \cos^2 \omega t = (1 + 2 \cos 2\omega t)/2$ となることからなんとなく分かると思います（分からなかったら無視して下さい）。第二高調波発生の難点は、波長 λ と $\lambda/2$ で屈折率（位相）を合わせないといけないということです。屈折率がなぜ重要かというと、殆どの物質では屈折率は波長によって変化するため、 λ と $\lambda/2$ では屈折率

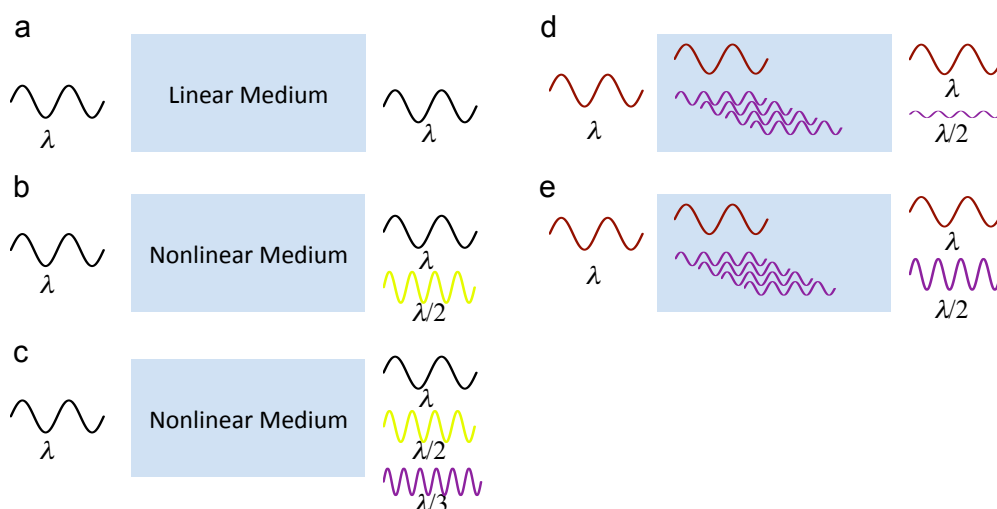


図 4a 線形光学の例 b, c 非線形散乱 d, e 第二高調波発生の位相整合の概念

が一致しないからです。図 4d は屈折率が一定でない（位相が合っていない）場合の例です。屈折率が λ と $\lambda/2$ で一致しないために、 $\lambda/2$ の位相が全体で合わず、最終的に出てくる光が弱くなっています。図4 e のように、位相が合っている場合は $\lambda/2$ の光が弱められずに効率良く出てきます。非線形光学の分野では第二高調波発生の際位相整合をどう行うかが課題となっています。私はシリコンの CMOS を作るプロセスによるデバイスで第二高調波を効率良く発生させる方法を研究していました。ニオブ酸リチウムのような材料は第二高調波発生によく用いられますがシリコンとの格子不整合が大きく成長が容易にはできません。そこで、私は窒化シリコンと金という CMOS プロセスで作れる材料を用いて第二高調波発生を行いました。具体的には金のプラズモン構造を使って第二高調波を発生させ、窒化シリコン導波路を用いて位相整合を行いました。導波路を使うことで一次(λ)と二次($\lambda/2$)のモード屈折率を一致させるというテクニックを使ったのですが、詳しく説明すると時間がかかるのでここでは割愛したいと思います。詳しく知りたい、という方がいましたら私の方までご連絡下さい。

3. アメリカ生活について

この半年何をしていたかを考えると、基本的には研究をして、研究以外の時間は筋トレと飲酒(例：図 5)しかしていないということに気づきました。昨年ベンチプレス 100 kg (225 lb) を達成しましたが、今年に入ってから伸び悩んでいるので、スケジュール管理とトレーニングをしっかりとやりたいと思います。

本当はこれを最後の報告書にして卒業したかったのですが、未だに卒業できておりません。大学から Block Grant Award というものを頂いたので、夏の間は大学から給料を貰えることになりまして、「それならすぐに卒業しなくてもいいか」という思考になってしまい、現在に至ります。夏までに職を探して博士論文を書き、次の報告書が最後になるよう、全力を尽くしたいと思います。



図 5 Sonoma の Barrel Tasting(新作ワイン飲み放題)