

氏 名	八井 崇
所属機関	東京大学
研究題目	ドレスト光子フォノンによるダイヤモンド紫外光源の開発

1. 研究の目的

間接遷移半導体はシリコンや、ダイヤモンド、SiC など、電子デバイスとして多く利用される一方で、光デバイスへの応用はシリコンの光検出器など限定的である。これは、光の吸収、発光に伴って、電子と正孔が生成、消滅する際に必要なエネルギーが光のエネルギーだけでは足りない、つまり、光だけで直接電子と正孔の生成、消滅させることができいためであり、この意味で間接遷移半導体と呼ばれている(なお、発光材料として利用される GaN などは、光だけで電子と正孔の生成、消滅が可能であることから直接遷移半導体と呼ばれている)。間接遷移半導体において、この光では足りないエネルギーを補助するものが、結晶中の原子の格子振動であるフォノンであるが、室温でのフォノンのエネルギーは光のエネルギーよりも 2 桁も小さいため、間接遷移半導体を用いた発光・受光デバイスは、ほとんど利用されていないのが現状である。

この、光の吸収・発光に伴う、足りないエネルギーを補う手法として、光がナノ空間に閉じ込められた時に発生する、空間的に非一様な光(近接場光)の性質を利用することで、発光・受光デバイスの高効率化を目指すことを目的とする。また、発光、受光デバイスのうち、デバイス作製が容易で、近接場光の効果をより簡便に調べることが可能で、また、光源の準備が容易なシリコン受光器に実験を絞って研究を行った。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

【原理】

近接場光によって、通常の光では足りないエネルギーが補える原理について説明する。この原理は不確定性原理によって説明される。不確定性原理によって位置(Δx)とエネルギー(Δk)の不確かさはある値よりも小さくならないという原理によって $\Delta x \Delta k \geq 1/2$ の関係がなりたつ。今、近接場光を利用する場合、空間的に位置が制限される、つまり Δx が小さくなることから、 Δk の値は必然的に大きい値となる。例えば、波長 500nm の光(波数 $k=2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$)が 10nm の領域に閉じ込められると、位置と運動量の不確定性関係から $\Delta k=5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ となり、赤外光から紫外光までの広いスペクトル(白色光)が得られることを意味している。このことによって、間接遷移半導体における光吸収、および発光における不足するエネルギーが補充される。なお、通常我々が利用する光がこの Δx が十分大きいため、 Δk はゼロに近い値となっており、その理由によって格子振動のエネルギーの助けがないと、発光・吸収が生じにくい。

【手法】

この不確定性原理による、光吸収の増大を確認するため、シリコン光検出器を作製した。近接場光の効果をシリコン検出器に高効率に作用させるため、横型 pn 接合を作製し、その pn 接合部分に、近接場光光源となる、金微粒子を配置して、光吸収特性の評価を行った。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

【経過・評価】

発生した電子を検出するための電極を p 層、n 層側に取り付けてた。また、検出電流を稼ぐために櫛歯構造とした。次に空乏層上に近接場光光源が生じるように、金微粒子を塗布した。

作製したデバイスの評価は、先ず金微粒子を塗布しない場合の光電流を測定し、その後、金微粒子塗布した状態で同じ領域での光電流の測定を行った。光源には白色レーザから特定の波長を切り出して利用した。

金微粒子塗布前後での光電流の増加率を計測したところ、波長が長くなるにつれて、増加率が增大していることが分かった。また、金微粒子を利用した場合、波長 600nm 近傍で、プラズモンによる電場増大効果があることが知られているが、本実験では、この効果による増大は見られなかった。

3. 研究の結論、今後の課題

間接遷移半導体であるシリコンに対して、近接場光による光吸収増大の効果を観測することに成功した。波長 700nm~1200nm の各波長において、近接場光による、光電流の増加率はおおよそ 10%程度であった。

今回あらゆる波長で、光吸収の増大を観測することができたが、まだまだ 10%程度と低いものであった。これは、金微粒子の被覆率が約数%と非常に低いためであるからと思われる。また、デバイスの構成上、空乏層の面積が小さく、ここに金微粒子が堆積している割合も低い。そのため、今後は、この被覆率を向上させ、さらには、空乏層に選択的に金微粒子を堆積させることが必要になってくるとと思われる。

また、空乏層を広くとるために、pn の間に intrinsic 層を挟んだ pin 構造の利用も有効と思われる。

今回は光の吸収について、近接場光による高効率化を実現できたが、受光と発光は逆プロセスであるため、同様な発光効率向上が期待される。

また、今回はシリコンで実験を行ったが、同様に間接遷移半導体であるダイヤモンドや SiC、また近年二次元材料として注目されている MoS_2 などの材料に対しても、効率増大が期待される。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

シリコンの検出器については、光通信帯で利用されることによって、非常に大きな需要が見込まれる。

また、シリコンの発光素子の実現することで、オールシリコンによる光デバイス・電子デバイス融合の応用発展が期待される。

本原理をダイヤモンドに適用することで、深紫外の発光体が期待される。現在、AlGaIn が主流となっているが、種々の問題により実用化が遅々として進んでいないのが現状である。本技術の応用によって、殺菌や水の浄化といった分野への応用が期待される。

4. 2. 学術的価値

従来間接遷移半導体は、電子デバイスとしてのみ利用されているが、本研究によって光デバイスとしての応用の道筋が得られてので、間接遷移半導体における、光物理の学術分野に大きなインパクトをもたらすと期待される。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- [1] T. Yatsui, S. Okada, K. Saichi, T. Sato, T. Ogamoto, S. Chiashi, S. Maruyama, M. Noda, K. Iida, and K. Nobusada, "Evaluation of Near-Field Assisted Absorption in Silicon by the Dispersion of Gold Nanoparticles," 投稿準備中
- [2] M. Noda, K. Iida, K. Nobusada, M. Yamaguchi, and T. Yatsui, "Direct Wave Vector Excitation in an indirect band gap semiconductor Silicon with an optical near-field," 準備中
- [3] T. Yatsui, H. Saito, and K. Nobusada, "Angstrom-scale flatness using selective nano-scale etching," Beilstein Journal of Nanotechnology, Vol. 8, October 18, 2017, pp.2181–2185.
- [4] T. Yatsui, M. Yamaguchi and K. Nobusada, "Nano-scale chemical reactions based on non-uniform optical near-fields and their applications," Progress in Quantum Electronics, September 2017, Vol. 55, pp. 166-194 (review article).
- [5] F. J. Brandenburg, T. Okamoto, H. Saito, O. Soppera, and T. Yatsui, "Surface improvement of organic photo-resists through a near-field-dependent etching method," Beilstein Journal of Nanotechnology, April 2017, Vol. 8, pp.784–788
- [6] T. Yatsui, T. Tsuboi, M. Yamaguchi, K. Nobusada, S. Tojo, F. Stehlin, O. Soppera, and D. Bloch, "Optically controlled magnetic-field etching on the nano-scale," Light: Science & Applications, Volume 5, March 2016; e16054 (7 pages)
- [7] T. Yatsui, K. Kuribara, T. Sekitani, T. Someya, M. Yoshimoto, "Temperature-modulated annealing of c-plane sapphire for long-range-ordered atomic steps," Journal Physics D, Volume 49, Number 11, 23 March 2016, 115302 (6 pages).