

2次元単原子層結晶の高効率可飽和吸収による 光振幅および光位相制御を用いた高速光スイッチングの研究

Fast optical switching by light intensity and phase control employing highly efficient saturable absorption in two-dimensional monoatomic-layer crystal

徳島大学大学院理工学研究部 助教 岸川 博紀

Department of Science and Technology, Tokushima University, Hiroki Kishikawa

要旨

我が国のインターネットにおける通信データ量は年々増加し変動も大きくなっており、この状況は今後も続くと予想されている。光通信ネットワークの更なる高速・大容量化、高効率化を実現する技術として、光信号処理に基づく光ルータが有用となる。本研究の目的は、光ルータの基本構成デバイスの一つとなる高速・高効率な光スイッチ技術を確立することである。特に2次元単原子層結晶の高効率な可飽和吸収効果を有効活用し、光信号の振幅・位相を制御することで光スイッチング動作の実現可能性を見出すことを目標とする。本報告では提案する光スイッチの動作原理について述べ、黒リンの特徴および可飽和吸収過程について説明している。また黒リン薄膜分散液の可飽和吸収特性を実験的に測定した結果、提案する光スイッチに十分適用可能な特性を持つことを明らかにしている。

1. はじめに

我が国のインターネットにおける通信データ量の状況は、総務省報道資料[1]によると2016年11月時点の総ダウンロードは前年比52.2%増の約8.3テラビット毎秒と年々増加している。また通信データ量の変動も大きくなっており、同時点の昼夜のダウンロード変動は約4.0テラビット毎秒で2年前に比べ2倍に到達している。このような通信を支えるネットワークへの要求条件として、更なる大容量化に加え、データ量変動に対応する柔軟性を持たせ、高効率に運用することが求められる。

このような要求に応えるため、光通信ネットワークの更なる高速・大容量化、高効率化を実現する技術として、光信号処理に基づく光ルータが有用となる。光ルータの基本構成デバイスの一つである光スイッチにおいても、光信号を高速に処理・制御できるだけでなく、高効率な

スイッチ動作を実現することが課題となる。

上記課題を解決するため、本研究ではピコ秒オーダーで動作可能な高速・高効率な光スイッチの要素技術を確立することを目的とする。特に2次元単原子層結晶の高効率な可飽和吸収効果を有効活用し、光信号の振幅・位相を制御することで光スイッチング動作の実現可能性を見出すことを目標とする。

第2節では本研究で提案する光スイッチ構成と動作について述べる。第3節では高効率な非線形光学材料である黒リンについてその特徴を述べる。第4節では黒リンを2次元単原子層結晶化させ可飽和吸収特性を測定した結果について述べ、第5節で本報告をまとめる。

2. 提案する光スイッチ構成と動作

図1に我々が提案する光スイッチの構成を示す。図の左側からの入力光は、光導波路を進む

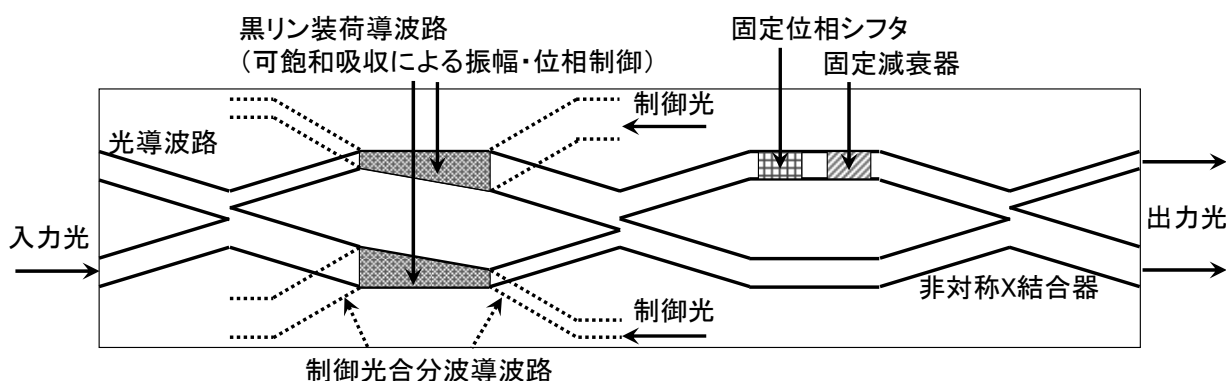


図1. 提案する光スイッチの構成

途上で非対称 X 結合器、黒リン装荷導波路、固定位相シフタ、固定減衰器を通り、右側の出力に現れる。黒リン装荷導波路において光信号の振幅および位相を制御することで、上側あるいは下側のどちらかに出力光を切り替えることができ、これが光スイッチング動作となる。制御光には波長あるいは偏光状態が信号光と異なるものを使用することで干渉を避け、黒リン装荷導波路への合波・分離を行い可飽和吸収を生じさせ光信号の振幅および位相を制御する。

具体的な動作原理は文献[2,3]で定式化し導出しているが、ここでは簡単な数値例を紹介する。まず出力光を図1の上側のポートにスイッチしたい場合を考える。このとき、2つの黒リン装荷導波路のうち上側でのみ約10%光を吸収し減衰させ、下側では光を吸収しないようにする必要がある。それとは逆に出力光を下側のポートにスイッチしたい場合は、上側の黒リン装荷導波路では光を吸収せず、下側でのみ約10%光を吸収し減衰させる必要がある。このように、2つの黒リン装荷導波路のうちどちらか一方で光を吸収し光強度を減衰させることで、出力光を上側あるいは下側のどちらか一方に出力させることができる。なおこの例では、固定減衰器では光強度を約1/40に減衰させ、固定位相シフタでは位相を変化させない設定とする必要がある。別の数値例でもスイッチング動作が実現可能な条件が複数存在する。

3. 黒リンの特徴

2次元単原子層結晶材料としては、2010年ノーベル物理学賞の受賞テーマである炭素原子が平面状に結合したグラフェンが良く知られており、新たな電子デバイスやディスプレイ、生体センサー等への応用が期待されている。しかしグラフェンにはバンドギャップが存在しないため高い電気抵抗を得ることが困難であり、信号のオンとオフの比を大きくとることができず、特にデジタル用途の電子・光学デバイスへの応用には課題が残る。

このようなグラフェンの課題を解決する新たな2次元単原子層結晶材料として、2014年頃よりリンの熱力学的に最も安定な同素体である黒リン(Black phosphorous, BP)が報告されてきた[4,5]。黒リンはグラフェンと異なりバンドギャップを持ち、積層数を変えることでバンドギャップが調整可能であることが報告されている。すなわち、黒リンは可視域の光を吸収できるようにも、赤外域の光を吸収できるようにも調整可能であることを意味している。光通信で用いられる波長は近赤外域であるため、黒リンは特に光通信デバイスとしての応用が期待できる材料である。

図2に文献[5]より引用した黒リンにおける可飽和吸収の様子を示す。光と物質の相互作用により、黒リンに入射した光エネルギーが吸収さ

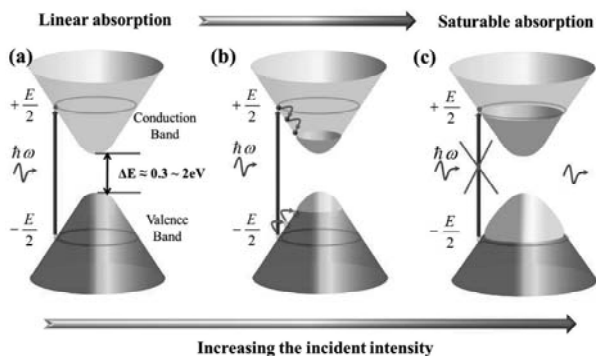


図2. 黒リンの可飽和吸収過程[5]

れ、初期状態(a)では価電子帯(Valence band)に存在した電子が励起され導電体(Conduction band)へと遷移する(b)。これに伴い光エネルギーは吸収されるため、入射光強度は減衰する。入射光強度がさらに大きくなると、自由電子が導電体で飽和するため、それ以上光が吸収されなくなり、入射光強度の減衰がなくなる(c)。この非線形光学現象を可飽和吸収(Saturable absorption)と呼び、入射光の強度に依存し出力光の強度に差が生じる現象である。本研究で提案する光スイッチはこの光強度差を利用しスイッチング動作を実現する。

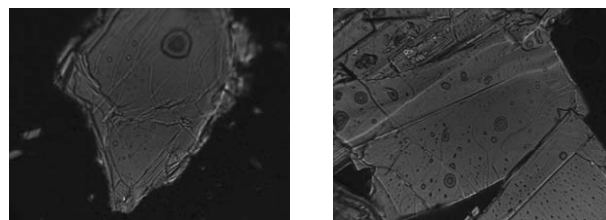
4. 黒リンの可飽和吸収特性測定実験

黒リンの可飽和吸収特性を測定するため、黒リンの薄膜化、ラマンスペクトルの測定、可飽和吸収特性の測定の順で実験を行った結果について報告する。

今回使用した黒リンは Smart elements 製の純度 99.998% のものである。薄膜化はスコッチテ

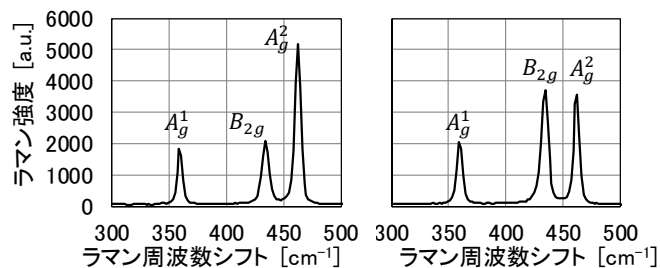


図3. 使用した黒リン(Smart elements製 純度99.998%)



(a) サンプル1 (b) サンプル2

図4. 黒リン薄膜の顕微鏡写真



(a) サンプル1 (b) サンプル2

図5. 黒リン薄膜のラマンスペクトル

ープ法を用い、繰り返しテープを剥離して薄膜化した後、予め洗浄・乾燥させたスライドガラスに転写した。図4は作製した黒リン薄膜の2つのサンプルの顕微鏡写真である。

次にラマン分光法を用いて薄膜化した黒リンのラマンスペクトルを測定した。ラマンスペクトルの測定には REINISHAW 社の顕微レーザーラマン分光装置 inVia ラマンマイクロスコープを使用し、励起レーザー波長は 532nm を用いた。図5に図4と同じ2つのサンプルのラマン周波数シフトを測定した結果を示す。図中のピークは黒リン分子の振動方向の違いを表しており、図5(a)サンプル1のピークの出方は単層黒リンが多層状に重なり薄膜になっていることを示している。一方の図5(b)サンプル2は薄膜化しておらずバルク状になっていることを示している。

本研究で提案する光スイッチはガラス光導波路を材料としているため、黒リン薄膜をガラスの屈折率に近いアクリルに分散させてガラス光導波路上に塗布することを考えている。黒リン薄膜をアクリルに分散させるため、2次元ナノ材料の調製法として簡単かつ効率的な液相剥離法を用いた。手順は以下の通りである。黒リン

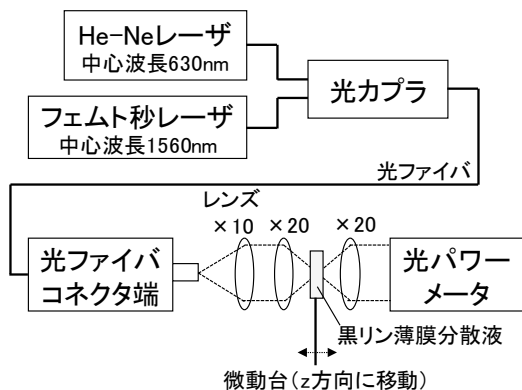


図6. Zスキャン法による可飽和吸収特性測定系

を乳鉢を用いて粉碎し、エタノール 3ml に対し黒リン粉末 3mg を分散させる。超音波処理後に 20 分間 1500rpm で遠心分離器にかけ、大きなサイズの沈殿を除去するため 24 時間以上静置させる。その後、分散液の上部 1/3 を集めたものを、PMMA(アクリル)をアセトンで溶かした溶液中に混ぜ十分に時間を置く。比較のため黒リンを混合していない溶液も作製した。

次に作成した黒リン薄膜分散液の可飽和吸収特性を測定した。図 6 に測定系を示す。測定には Z スキャン法を用いたが、これはレーザー光をレンズで絞りその焦点に光パワーを集中させ、対象となる材料を焦点付近で微動させて移動距離に対する受光パワーを測定する方法である。焦点付近では黒リン薄膜分散液に高強度の光が当たり、可飽和吸収が生じ受光パワーは減少なくなる。一方焦点から外れると黒リン薄膜分散液に当たる単位面積当たりの光強度が弱くなり、可飽和吸収が生じず受光パワーが減少する。図 6 の He-Ne レーザは赤色可視光で測定系の光軸調整に用いた。実際の可飽和吸収の測定には、光通信波長帯である波長 1560nm のフェムト秒レーザー (Alnair Labs, PFL-200, パルス幅 570fs, パルス繰返周期 40MHz) を用いた。光パワーメーターで時間平均受光パワーを測定した。

図 7 に Z スキャン法で測定した移動距離に対する平均受光パワーを示す。青丸の曲線が黒リン薄膜分散液の測定結果で、赤四角の曲線が黒

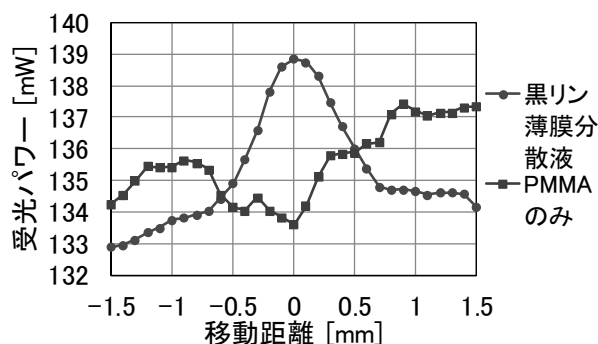


図7. 可飽和吸収特性測定結果

リンを含まない PMMA 溶液の測定結果である。黒リン薄膜分散液の平均受光パワーは移動距離ゼロでピーク値 139 μ W となり、正負方向に移動すると減少していることが分かる。すなわち可飽和吸収が発生している状況が実験で確かめられた。可飽和吸収による平均パワーの増加率は約3%となり、既報告と近い値が確認できた。今回の実験系では装置の都合でフェムト秒レーザーのパルスピークパワーの増加率は直接測定できなかったが、スペックを基に換算しても約3%の増加率となる。第2節で記述したように、本研究で提案する光スイッチを制御するためには約10%の減衰が必要であるが、本測定結果をそのまま利用した場合を想定すると、約3段連続接続させることで十分実現可能であることが示された。実際に光スイッチに適用する場合は、本実験のように光の進行方向に対し垂直に黒リン薄膜を置くのではなく、進行方向と平行に光導波路上に塗布するため、増加率はより大きくできると考えている。一方の PMMA 溶液の場合は、図 7 より中心のピークは無く可飽和吸収は見られなかった。

5. まとめ

本研究で提案する光スイッチでは、2次元単原子層結晶である黒リン薄膜による可飽和吸収特性を用いた光波制御について検討している。本報告では光スイッチの動作原理、黒リンの特

徴について述べ、また黒リン薄膜の可飽和吸収特性を測定した。その結果、提案する光スイッチに十分適用可能な特性であることを明らかにした。

今後はガラス光導波路状に黒リン薄膜分散液を形成し、導波光による可飽和吸収特性の計測を実施し、更に導波光の減衰を波長の異なる制御光で制御することを考えている。その後、提案する光スイッチ構成で全光スイッチング実験を行う予定である。

謝辞

本研究は徳島大学大学院理工学研究部の後藤信夫教授との共同研究です。本研究をご支援くださいました公益財団法人 京都技術科学センターに深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算（平成 28 年 11 月時点），平成 29 年 2 月 7 日 総務省報道資料，
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000119.html
- [2] M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, S. Yanagiya, “Saturable absorption by vertically inserted or overlaid monolayer graphene in optical waveguide for all-optical switching circuit,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 6602109-1--9, Oct. 2013.
- [3] H. Kishikawa and N. Goto, “Optical switch with cascaded two-stage Mach-Zehnder interferometers using optical signal amplitude and phase control,” *Photonics in Switching 2015 (PS2015)*, Florence, Italy, no. Poster.5, pp. 217-219, Sep. 2015.
- [4] H. O. H. Churchill and P. Jarillo-Herrero, “Two-dimensional crystals: Phosphorus joins the family,” *Nature Nanotechnology*, vol. 9, no. 5, pp. 330-331, May 2014.
- [5] S. B. Lu, L. L. Miao, Z. N. Guo, X. Qi, C. J. Zhao, H. Zhang, S. C. Wen, D. Y. Tang, and D. Y. Fan, “Broadband nonlinear optical response in multilayer black phosphorus: an emerging infrared and mid-infrared optical material,” *Optics Express*, vol. 23, no. 9, pp.11183-11194, May 2015.