19a-P2-18

## 半導体-金属遷移を利用したグラフェン光変調器の検討 Investigation of graphene optical modulators based on semiconductor-metal transition 東大院工 嘉陽田達矢,韓在勲,竹中充,高木信一 The University of Tokyo

## Tatsuya Kayoda, Jaehoon Han, Mitsuru Takenaka, Shinichi Takagi E-mail: kayouda@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【はじめに】近年、グラフェンの特殊なバンド構造を利用した光変調器が注目を集めている。今回 我々は、グラフェンの化学ポテンシャル µcの変化 による半導体-金属遷移を利用した光変調器を提 案し、その変調特性についてシミュレーションを 行った。また、グラフェンゲートメタル MOS キ ャパシタを作製して化学ポテンシャルの変化量 を算出することで、提案したグラフェン光変調器 の実現可能性について検討したので報告する。

【グラフェンの半導体-金属遷移】 グラフェンに角 周波数 $\omega$ の光が入射するとき、グラフェンの $\mu_c$ が $\hbar\omega/2$ より小さい場合、半導体のようにバンド 間遷移吸収が起きる(Fig.1(a))。一方、 $\mu_c$ が $\hbar\omega/2$ より大きければ、バンド間遷移は抑制され、金属 のようにバンド内遷移に吸収が中心となる(Fig.1 (b))。このようにグラフェンの光学的性質が半導 体から金属的に遷移する $\mu_c$ の値はおよそ $\hbar\omega/1.67$ であると理論的に予想されており[1]、波長1550 nmの光に対しては約 0.48 eV となる。

【シミュレーション結果】Fig.2(a)に示した構造 の素子において、グラフェンの半導体-金属遷移を 利用した光変調器の特性を時間領域 BPM 法でシ ミュレーションした。SOI 基板上に作製された Si の光配線導波路上に単層グラフェンが装荷され た構造になっている。Si 導波路の厚さは 220 nm、 グラフェンの厚さは 0.7 nm とした。シミュレーシ ョンの結果を Fig. 2 (b) に示す。入射光の波長は 1550 nm とした。µcが 0 eV から 0.4 eV に増加する に従って、バンド間遷移が抑制されることから、 TE、TMモードいずれも吸収が減少する。一方、 μ<sub>c</sub> = 0.48 eV 前後でグラフェンが金属的性質に遷 移することで、TMモードの光吸収が大きく増加 する結果となった。TM モードに対しては 0.46 eV ~0.51 eVのµcの変化に対し 0.61 dB/µmの変調度 が得られており、バンド間吸収の変化を用いたこ れまでのグラフェン変調器[2]よりも6倍程度高 性能化することが期待される。

【MOS キャパシタによる $\mu_c$ 変化量の算出】半導体-金属遷移を用いたグラフェン光変調器を波長 1550 nm で実現するためには、 $\mu_c$ を 0.51 eV までゲート電圧で変調する必要がある。この $\mu_c$ に対応するグラフェン中の蓄積電荷密度[3]はおよそ 2×10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>程度となり、ゲート絶縁膜の破壊が懸

念される。そこで、Fig. 3 に示すグラフェンゲー トメタル MOS キャパシタの *C-V* 測定を行い、蓄 積電荷密度  $n_s$ から  $\mu_c$ を算出することで、今回提案 するグラフェン変調器の実現可能性を検討した。 *C-V*測定の結果を Fig. 3 (a) に示す。ゲート電圧 0 V 付近における *C-V*曲線の凹みは、グラフェンのデ ィラク点近傍における量子容量の低下[4]による ものだと考えられる。このことから、我々はここ がグラフェンのディラック点であると考え、この 電圧から絶縁破壊電圧まで *C-V*曲線を積分するこ とによって  $n_s$ を求めた。ゲート電圧  $V_g$ に対する  $n_s$ および  $\mu_c$ の変化を Fig. 3 (b) に示す。この結果、 グラフェンゲートメタル MOS 構造において、グ ラフェンの $\mu_c$ を 0 eV から 0.51 eV まで変調できる ことが分かり、提案した光変調器の実現可能であ ることが示された。

【謝辞】本研究の一部は倉田記念日立科学技術財団の助成に よって実施した。

【参考文献】[1] S. Mikhailov and K. Ziegler, *Physical Review Letters*, vol.99, no.1, pp. 1-4 (2007). [2] M. Liu et at, *Nature*, vol. 474, no. 7349, pp. 64-67 (2011). [3] G. W. Hanson, *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 6, p. 064302 (2008). [4] J. Xia et al, *Nature nanotechnology*, vol. 4, no. 8, pp. 505-509 (2009).



Fig. 1 (a) Inter-band transition. (b) Intra-band transition in graphene.



Fig. 2 (a) Cross-sectional schematic of graphene optical modulator. (b) Absorption in graphene optical modulator for TE- and TM-polarized lights as a function of chemical potential.



Fig. 3 (a) C-V curve of graphene-gate-metal MOS capacitor. (b) Accumulated carrier density and chemical potential in graphene.