エネルギー移動を利用した量子ドットの禁制遷移に対する光励起

Optical Excitations for Forbidden Transitions in Quantum Dots using an Energy Transfer

日亜化学工業(株)、 川添 忠
Nichia Corp., Tadashi Kawazoe
E-mail: tadashi.kawazoe@nichia.co.jp

光合成植物は捉えた光を巧みに光合成反応に用いている。簡単に説明すると光学活性な単体のクロロフィル分子で光を吸収し、このエネルギーを円環状にクロロフィル分子が連結されることによって光学禁制となった別の分子にエネルギー移動させる機構を利用している。つまり、光学禁制の分子にエネルギーを移動させることで捉えた光エネルギーが容易には漏出しないような機構を持つのである。この現象はエネルギー移動の応用に非常に有用であると思われる。本発表ではより安定な無機材料での光学禁制準位を介したエネルギー移動の再現、そのいくつかの応用について紹介する。

塩化第一銅（CuCl）は閃亜鉛構造を持つのに加え、Split-off band が伝導帯(バンドギャップエネルギー：3.2eV)の頂上となる特徴を持つ。このためバンド端の電子状態は極めて単純な構造となる。このような研究対象としての素性の良さから光物性研究に広く用いられてきた。CuCl の光吸収端を構成する Z_3 励起子の束縛エネルギーは 200meV 以上あり、CuCl 結晶の量子ドットに現れる量子サイズ効果は典型的な励起子閉じ込めモデルで説明される。

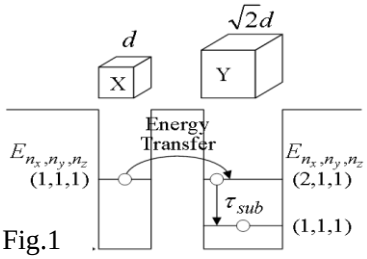

Fig.1

粒径数 nm の CuCl 量子ドットは例えばガラスや NaCl と混合し溶融の後、凝固、再結晶化を行うことで容易に得られる。面白い事に NaCl 結晶中に成長させた場合、CuCl 量子ドットの形状は立方体となる。大きな NaCl のバンドギャップエネルギー(8eV)のため CuCl 量子ドットのエネルギー準位は無限井戸に閉じ込められた励起子準位という単純なモデルで表される。このエネルギーは量子化準位の主量子数を n_x, n_y, n_z であらわすと、

$$E_{n_x,n_y,n_z} = E_B + \frac{\hbar^2\pi^2}{2M(L-a_B)^2}(n_x^2+n_y^2+n_z^2)$$

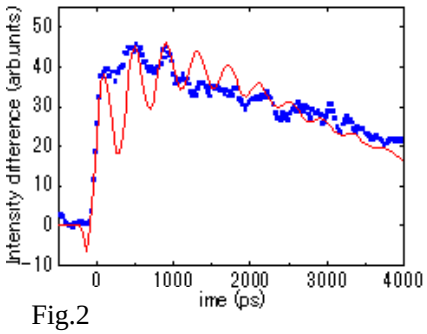

Fig.2

で与えられる。ここで E_B はバルク結晶の Z_3 励起子エネルギー、M は励起子の有効質量、a_B は励起子のボーア半径である。さてこの主量子数に偶数が含まれると準位への光遷移は禁制遷移となることは光電場と励起子の波動関数の重なり積分がゼロになることから自明である。しかしながら Fig.1.に示す通り、距離 10nm 以内程度の領域に寸法比 1:√2 を満たすような別の小さな量子ドットが存在する場合、この小さな量子ドットの主量子数(1,1,1)の準位を介した(2,1,1)準位へのエネルギー移動が起こるため光学許容であるかのように振る舞う。[1]

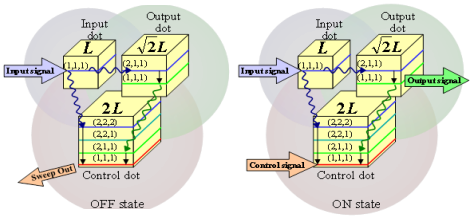

Fig.3

このエネルギー移動はその時間発展を計測すると Fig.2.に示すように章動現象が現れる。また、ナノ寸法の光スイッチに応用可能であり、Fig.3.にその動作原理を示す。[2]NaCl 結晶では偶然に並んだ 2 つまたは 3 つの量子ドットを使ったが、MBE 法で作る 2 層の InAs/GaAs 量子ドットは垂直に並んで配列する事を利用したナノ寸法光スイッチも可能である。(Fig.4.)[3] これに加え、エネルギー移動をどう観測するかについて、多数個の量子ドットを使った光機能素子、についても紹介し、このエネルギー移動と量子ウォークの関係についても述べる予定である。

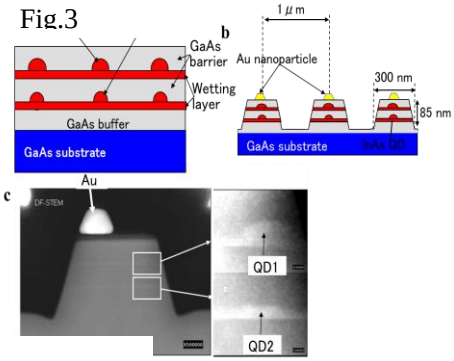

Fig.4

[1] M. Ohtsu, et al., IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron 8, 839 (2002).
[2] T. Kawazoe, K. Kobayashi, S. Sangu, and M. Ohtsu, Appl. Phys. Lett., 82, 2957 (2003).
[3] Principles of nanophotonics, M.Ohtsu, T. Kawazoe et.al..(2008).

© 2022年 応用物理学会