

励起子ライマン分光法の理論

稲垣 剛 (奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科)

可視光によって半導体中に生成された電子と正孔は、Coulomb 引力が働くために十分低密度では励起子と呼ばれる束縛状態を作る。励起子半径が励起子間距離に比べ十分小さいとみなせる領域では励起子は Bose 粒子とみなすことができるので、低温では Bose-Einstein 凝縮 (BEC) が観測されると予測されている。この予測は 1962 年に Moskalenko [1] と Blatt 達 [2] のグループによってそれぞれ独立に提唱された。以来多くの研究者たちが励起子 BEC の観測を試みてきたが、低温かつ高密度に励起子を生成することが困難であるため、決定的な実験結果はいまだ得られていないのが現状である。

価電子帯と伝導帯の間で双極子遷移が禁制である Cu_2O は、励起子 BEC の観測を目指した実験でしばしば用いられてきた。電子と正孔の間に働く交換相互作用の為に、主量子数 $n=1$ 状態の励起子は 3 重に縮退したオルソ励起子と、これよりエネルギーの低いパラ励起子とに分裂する。弱い 4 重極子遷移によって光学遷移可能なオルソ励起子に対して、光学的に不活性なパラ励起子は非常に長い寿命をもつため、低温かつ高密度に励起子を生成できると考えられている。これまでに、低温かつ高密度に生成された、 Cu_2O において励起子の量子統計性が表れたものと解釈される現象が幾つか報告されている [3, 4]。しかし、可視領域における発光スペクトルの形状から励起子密度を精密に求めることができないために、これらの現象が励起子 BEC に起因するものであるというコンセンサスは得られていない。

21 世紀に入りテラヘルツ光を用いた実験技術が非常に進歩した。これとは別に、励起子の $1s$ 状態から $2p$ 状態への遷移を伴うテラヘルツ光の吸収スペクトル形状から励起子の運動量分布を求める方法が新たに開発された [5]。これらの背景から励起子 BEC の観測にテラヘルツ光を用いる考えが現れてきた。すなわち低温かつ高密度に生成した Cu_2O の $1s$ パラ励起子の $1s-2p$ 遷移に伴うテラヘルツ光吸収スペクトルの形状から励起子密度を測定しようとする試みである [6]。テラヘルツ光吸収は可視光吸収とは異なる選択則に従うために、 $1s$ パラ励起子の密度を実験的に求めるのに非常に有用な手法と言える。

本研究課題では、半導体中に高密度に生成された励起子多体系におけるテラヘルツ光の応答を、Coulomb 相互作用する 2 バンド電子正孔モデルを用いて理論的に解析する。このような解析は励起子のエネルギー準位や励起子間相互作用パラメータを別途導入する必要がなく、スペクトル形状に重要な寄与を与える励起子間の非弾性の効果も考慮できる点で優れている。現在、テラヘルツ光をプローブに用いた振動数領域におけるポンプ・プローブスペクトルを計算している。

ポンプ光 (可視光) の寄与は Galitskii 変換 [7] を用いて考慮し、テラヘルツ光の吸収スペクトルを横波誘電関数の運動方程式を数値的に解くによって求める。横波誘電関数の運動方程式は、時間に依存した Hartree-Fock 近似に基づいて求める。この方針は以前、電子正孔 BCS 状態におけるテラヘルツ光吸収スペクトルを解析した際にとったものと同じである [8, 9]。電子正孔 BCS 状態と

は、電子正孔間の平均距離が励起子半径よりも短くなった密度領域における巨視的量子状態であり、電子正孔 BCS 状態から励起 BEC 状態への移り変わりは、原子系における BCS-BEC クロスオーバーと類似の現象である [10]。参考文献 [8, 9] で考慮されたのは、リング型のダイアグラムに対応する項であったが、今回の計算で重要になるのは梯子型のダイアグラムである。低密度領域におけるテラヘルツ光吸収スペクトルが、励起子 Lyman 分光法によって得られるスペクトルに対応している。

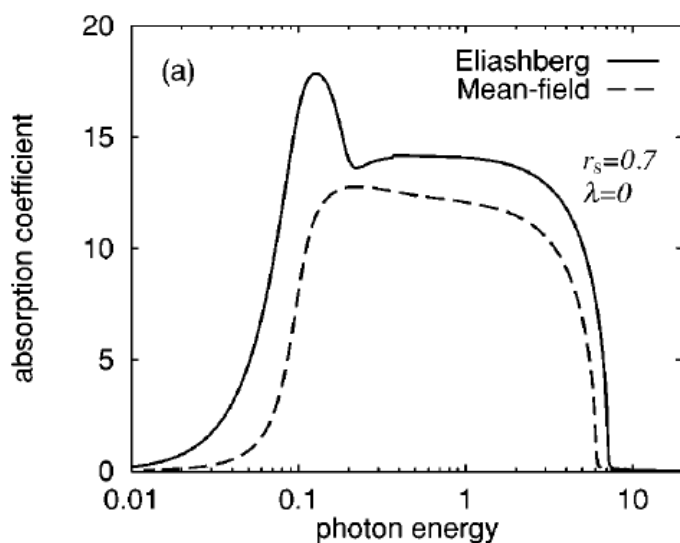


図1 電子正孔 BCS 状態におけるテラヘルツ光吸収スペクトル。エネルギーのスケールは励起子の束縛エネルギーである。 r_s は励起子半径でスケールされた電子正孔間の平均距離。実線は電子相関（有効質量および波動関数のくりこみ効果）を考慮した結果。破線は平均場近似による結果。文献 [8] から引用。

参考文献

- [1] S. A. Moskalenko, Fiz. Tverd. Tela. **4** (1962) 276.
- [2] J.M. Blatt, K.W.Boer, and W. Brandt, Phys. Rev. **126** (1962) 1691.
- [3] D.W. Snoke, J.P. Wolfe, and A. Mysyrowicz, Phys. Rev. B **41** (1990) 11171.
- [4] E. Fortin, S. Fafard, and A. Mysyrowicz, Phys. Rev. Lett **70** (1993) 3951.
- [5] K. Johnsen and G.M. Kavoulakis, Phys Rev. **85** (2002) 858.
- [6] M. Kuwata-Gonokami, M. Kubouchi, R. Shimano, and A. Mysyrowicz, J. Phys. Soc. Jpn **73** (2004) 1045.
- [7] V.M. Galitskii et al, Sov. Phys. JETP **30** (1970) 117.
- [8] T.J. Inagaki and M. Aihara, Phys. Rev. B **66** (2002) 075204.
- [9] T. J. Inagaki and M. Aihara, J. Lumin. 94-95 (2001) 533.
- [10] T.J. Inagaki and M. Aihara, Phys. Rev. B **65** (2002) 205204.