



## 河野淳一郎

ライス大学 電気・コンピューター学科 助教授

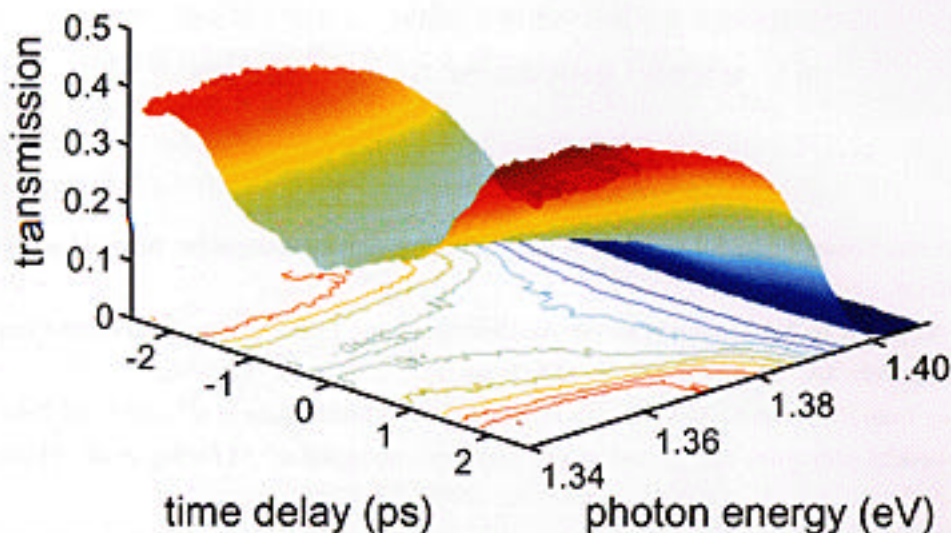
プロフィール：1966年4月14日、大阪府生まれ。1990年3月東京大学工学部物理工学科卒業。1992年3月東京大学工学系大学院修士課程終了。1995年8月ニューヨーク州立大学バッファロー校、物理学博士課程終了 (Ph. D. in Physics)。1995年9月～1997年9月カリフォルニア大学サンタバーバラ校、客員ポストドク。1997年9月～2000年6月スタンフォード大学ハンセン実験物理学研究所、主任研究員兼物理学講師。2000年7月～現在、ライス大学電気・コンピューター学科、助教授。

# 半導体における非共鳴非摂動非線形光学効果

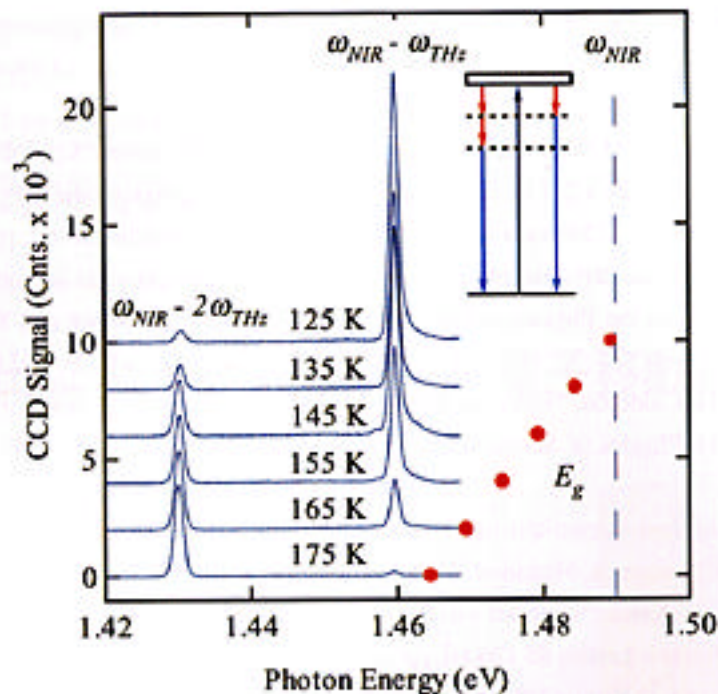
## 要旨：

本研究の目的は、中赤外・遠赤外（またはテラヘルツ）強電場下に置かれた半導体の光学的性質を調べることである。強電場中のプロホ粒子の運動、またそれによる系の光学的性質の変化を理解することは固体物理学における中心課題の一つである。強電場に揺すられた電子、正孔、励起子のダイナミクスは半導体バンド端近傍の光学的性質に劇的な影響を与える。例えば、よく知られたフランツ・ケルディッシュ効果や量子閉じ込めシュタルク効果においては、強電場はバンド端以下の吸収を引き起こし、励起子共鳴線を大きく動かす。このような電気光学効果は基礎・応用両面において興味を持たれ、バルクおよび種々の量子閉じ込め半導体構造において幅広く研究されてきた。

さて、強電場の周波数を徐々に上げていくと何が起こるであろうか？交流電場中の量子系は振動数と電場強度の相対比によって非常に異なった振る舞いをする事が知られている。非共鳴現象に話を限れば、これらの振る舞いは動重エネルギー（運動エネルギーの時間平均）とフォトンエネルギーの比によって古典領域と量子領域に分類される。我々は半導体中でこの両者がほぼ同様に重要になる領域において異常に大きな超高速電気光学効果の観測に成功した。バンド端以下約1電子ボルトにまでおよぶこの巨大誘導吸収は、30年以上前に理論的に予言されたダイナミック・フランツ・ケルディッシュ効果としてうまく説明できる。図1にGaAsにおける典型的なデータを示す。中赤外強電場の超短パルスの存在する瞬間のみに巨大誘導吸収が起きることが見える。



上記の巨大誘導吸収に加え、様々な多光子非線形過程を中・遠赤外領域で調べた。小さなフォトンエネルギーは帯間吸収を最小化することによって試料破壊を防ぐ。また、長波長領域に存在する小さな分散は長い位相整合距離を可能にする。さらに、動重ポテンシャルはフォトンエネルギーと同程度までに増大する。これらの利点を最大限に利用して、我々は最大7光子まで含む過程の観測に成功した。サイドバンド発生プロセスにおいては、微弱な可視光線がテラヘルツ電場に揺すられた半導体を透過する際にテラヘルツ周波数の整数倍だけ離れたサイドバンド周波数を取得する（図2参照）。



我々はテラヘルツ電場にドライブされた半導体のバンド端近傍の光学的性質はこれらのサイドバンド光に圧倒的に支配されることを示した。

このような研究は、非平衡多電子系の非線型ダイナミクスに対して全く新しい知見を与えると共に、技術的に未開の地である中・遠赤外領域で作動する半導体デバイスの開発につながる。特に、上記の様々な結果を利用した超高速スイッチング・超高速電気光学変調の実現は、光通信・光コンピュータの分野への応用が期待される。

## 研究成果

### 招待論文・解説記事：

1. J. Kono, "Cyclotron resonance," in *Methods in Materials Research*, edited by E. N. Kaufmann, R. Abbaschian, A. Bocarsly, C.-L. Chien, D. Dollimore, B. Doyle, A. Goldman, R. Gronsky, S. Pearton, and J. Sanchez (John Wiley & Sons, New York, 2001), Unit 9b.2.
2. J. Kono and A. H. Chin, "Extreme midinfrared nonlinear optics in semiconductors" (invited paper), to be published in the *Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves*.
3. J. Kono and A. H. Chin, "Extreme nonlinear optics in semiconductors with small energy photons" (invited paper), to be published in the *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications*, *Jpn. J. Appl. Phys., Suppl.*
4. T. Inoshita, J. Kono, and H. Sakaki, "Resonant terahertz sideband generation in quantum wells and exciton spectroscopy," *日本物理学会誌* **53**, 700 (1998).
5. J. Kono, M. Y. Su, J. Cerne, M. S. Sherwin, S. J. Allen, Jr., T. Inoshita, T. Noda, and H. Sakaki, "Resonant generation of terahertz optical sidebands from confined magnetoexcitons" (invited paper), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **144** (1998), pp. 115-122.
6. J. Kono and T. Inoshita, "Terahertz spectroscopy of excitons with free-electron lasers," *固体物理* **32** (1998), pp. 617 - 624.

### 発表論文・会議プロシーディング：

7. A. H. Chin, J. Kono, and G. S. Solomon, "Absence of exciton quenching in the presence of strong fields at high frequencies," *Optics Letters*, in press.
8. M. A. Zudov, J. Kono, A. P. Mitchell, and A. H. Chin, "Time-resolved, nonperturbative, and off-resonance generation of optical terahertz sidebands from bulk GaAs," *Physical Review B - Rapid Communications* **64** (2001), 121204(R).
9. A. H. Chin, O. G. Calderón, and J. Kono, "Extreme midinfrared nonlinear optics in semiconductors," *Physical Review Letters* **86** (2001), pp 3292-3295.
10. O. G. Calderon, A. H. Chin, and J. Kono, "Multiphoton processes in the presence of self-phase modulation," *Physical Review A* **63** (2001), 053807 (9 pages).
11. Y. H. Matsuda, T. Ikaida, N. Miura, M. A. Zudov, J. Kono, and H. Munekata, "Electron cyclotron resonance in In<sub>0.15</sub>Mn<sub>0.85</sub>As," *Physica E* **10** (2001), pp. 219-223.

12. M. A. Zudov, A. P. Mitchell, A. H. Chin, J. Kono, and K. Johnsen, "Non-perturbative terahertz sideband generation from bulk GaAs," Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors, edited by N. Miura and T. Ando (Springer-Verlag, Berlin, 2001), pp. 77-78.
13. M. A. Zudov, J. Kono, T. Ikaida, Y. H. Matsuda, N. Miura, S. Sasa, and M. Inoue, "Cyclotron resonance anomalies near the semimetal-semiconductor transition in a 2D electron-hole system," Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors, edited by N. Miura and T. Ando (Springer-Verlag, Berlin, 2001), pp. 991-992.
14. J. Kono and A. H. Chin, "Ultrafast electro-absorption at the transition between classical and quantum response," Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors, edited by N. Miura and T. Ando (Springer-Verlag, Berlin, 2001), pp. 188-189.
15. J. Kono, A. H. Chin, and O. G. Calderón, "Extreme mid-infrared nonlinear optics in semiconductors," Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors, edited by N. Miura and T. Ando (Springer-Verlag, Berlin, 2001), pp. 583-584.
16. A. H. Chin and J. Kono, "Ultrafast electro-absorption at the transition between classical and quantum response," Ultrafast Phenomena XII, edited by T. Elsaesser, S. Mukamel, M. M. Murnane, and N. F. Scherer (Springer Verlag, Berlin, 2001), p. 360.
17. A. H. Chin, J. M. Bakker, and J. Kono, "Ultrafast electro-absorption in semiconductors at the transition between classical and quantum response," Physical Review Letters **85** (2000), pp 3293-3296.
18. A. P. Mitchell, A. H. Chin, and J. Kono, "Picosecond time-resolved cyclotron resonance of non-equilibrium carriers in semiconductors," Physica B **272** (1999), pp. 434-437.
19. J. Kono, A. H. Chin, A. P. Mitchell, T. Takahashi, and H. Akiyama, "Picosecond time-resolved cyclotron resonance in semiconductors," Applied Physics Letters **75** (1999), pp. 1119-1121.
20. A. P. Mitchell, A. H. Chin, and J. Kono, "Direct observation of intraband carrier relaxation phenomena in semiconductors with a picosecond free electron laser," Proceedings of SPIE, Vol. **3617** (1999), pp. 137-145.