

## 半導体における全量子力学的光学応答理論と非線形光子制御への応用

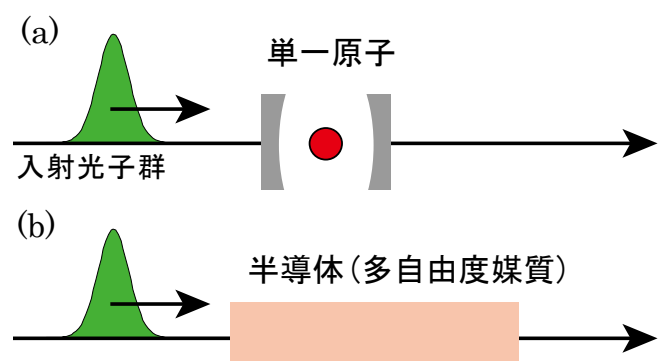
越野 和樹(東京医科歯科大学教養部)

光子の量子状態を別の光子を用いて制御する「全光学的量子制御」は現代物理学の最も挑戦的な課題の一つです。単一光子に敏感な巨大非線形光学効果が実現できれば量子計算（制御位相ゲート）に応用できることは古くから指摘されてきましたが[1]，単一光子程度の超微弱光領域では非線形光学効果はほとんど期待できません。そのため，線形光学素子を用いて確率的に量子計算を達成する方法や[2]，強い古典光により微弱光学非線形性を増幅して利用する方法[3]などが，代替手法として提案されてきました。

一方，共振器の電場増幅効果と，原子など少数離散準位構造を持つ量子系の飽和非線形効果を同時に用いると，単一光子程度の超微弱光においても有意な非線形効果が得られる，との実験的報告が1995年に提出されています[4]。この実験結果を踏まえ，私は，単一光子間非線形効果の最有力候補である「共振器+少数準位量子系」（図a参照）における光子ダイナミクスの理論研究を展開して参りました。その結果，(i)たった二光子でも非線形効果による符号反転が原理的に達成可能である[5]，(ii)超微弱光であっても光子の上・下方変換（二次非線形光学過程）を高効率で誘起しうる[6]，といった次世代量子操作技術に極めて有用な非線形光子ダイナミクスの可能性が「共振器+少数準位量子系」には秘められている，という事実を認識するに至りました。

このように，非線形光学系として実に魅力的な「共振器+少数準位量子系」ですが，これの典型的な実現方法は共振器中に原子分子を落下させるという大掛かりなものであり，過渡的（原子が共振器を通過している間）にしか実現できない，といった欠点を抱えています。一方，半導体などの固体光学媒質はこのような欠点とは無縁であり，集積化等の面でも遥かに優っているといえます。また，量子多体効果に由来する，少数準位系にはない新たな特性を付加できる可能性が期待できます。これらの理由から，本研究課題では，図b

に示すような，半導体を想定した多自由度光学媒質における光子群の非線形ダイナミクスの理論的解明を目的とします。具体的な到達目標は次の通りです。(i)解析手法の開発：これまで古典光を念頭に構築されてきた半導体光学応答理論を，単一光子群の理論へと「翻訳」する手法を確立します。(ii)次世代量子技術に有用な非線形光子ダイナミクスの探索：「共振器+少数準位量子系」と等価な効果，更にそれを超えた効果を発現させるための必要条件を明確化します。



- (a)共振器+少数準位量子系.  
光子制御に極めて有用な非線形光子ダイナミクスが期待できる.
- (b)本課題で扱う状況.

本研究では、次の二点を具備した「全量子論的光学応答理論」に解析の基礎を置きます。(i) 従来の半導体光学応答理論では、光学媒質は量子論的に厳密に扱うものの光は高強度古典光に限定されており、単一光子など非古典光を扱うことができません。一方、量子光学分野では、光の量子性を考慮するものの、非線形媒質はモード間結合定数として現象論的に導入されるに過ぎず、共鳴領域の議論に適用できません。表に示すように、本研究では光・物質の双方を量子力学的自由度として取り扱い、両者のコヒーレンス交換を定量的に記述する枠組に立脚します。(ii) 本研究では、数個の光子群による非線形効果発現をめざすため、大きな非線形効果の期待できる近共鳴領域を扱います。この分散性の高い領域では、光のパルス形状は物質との相互作用により大きく変形するため、単一モードとしての扱いが不可能になります。量子情報処理の観点からは、パルス形状の歪みは「光子量子ビット」の忠実度の劣化に繋がります。よって本研究においては、伝播光子場に元来付随している「連続多モード」性を正しく取り入れ、光子パルス形状の時間的変化も定量的に解析します。これら二点を具備した厳密な定式化は既存の半導体光学応答理論では全く使われていない本研究課題の独創的な点であり、非線形光学効果を用いた単一光子群制御の定量的な指導原理を提供できます。

本研究課題

	半導体光物性理論	量子光学理論	半導体量子光学理論
光の量子性	古典電磁波	量子化	光・物質双方を量子化
物質の量子性	量子化	相互作用定数	
光パルス記述	連続モード	単一モード近似	連続モード

参考文献

- [1] G. J. Milburn, Phys. Rev. Lett. **62** (1989) 2124.
- [2] E. Knill et al, Nature **409** (2001) 46.
- [3] T. P. Spiller et al, New J. Phys. **8** (2006) 30.
- [4] Q. A. Turchette et al, Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 4710.
- [5] K. Koshino, Phys.Rev. Lett. **98** (2007) 223902.
- [6] K. Koshino, Phys. Rev. A **79** (2009) 01380.