

単一原子/光子を操作するナノ光ファイバー



白田 耕 藏

電気通信大学フォトリックイノベーション研究センター

光の発生や伝播を光子のレベルで操作制御することは光物理学のトピックスの一つである。また関連研究は応用の視点からも、量子情報処理を実現するための基盤技術として世界の各所で様々に展開されている。本稿では、我々がこの10年来研究を進めているナノ光ファイバーによる単一原子/光子の操作制御法について実験技術を中心に紹介する。

ナノ光ファイバーとは、通常の単一モード光ファイバーの一部をサブミクロン直径（伝播光の半波長程度）まで極細化したものであり、応用の視点からは単一原子/光子の操作制御機能を将来の量子情報光ファイバーネットワークに直接的に組み込み可能なことが要点である。一方、物理的には光のモード密度分布を直径が波長程度の微小なナノファイバー伝播モードに局在集中させることがその要点である。モード局在の結果、ナノファイバー近傍に配置した原子の光応答は自由空間と大きく異なるよう操作し制御することができる。典型例は原子の自然放出であり、ナノファイバー表面近傍では原子の自然放出は異方的となり、放出蛍光全光子の20%以上がファイバー伝播モードに放出される。即ち、ナノファイバー上に単一原子を配置すれば、その蛍光を量子情報処理のキー要素の一つである単一光子の列としてファイバーモード中に効率良く発生できる。また、ナノ光ファイバー近傍に原子を配置すれば、原子に共鳴する伝播光の散乱確率は大きく高まり、結果としてファイバー伝播光に対し高光学密度系を少数原子で生成できる。ナノファイバー伝播光の高光学密度原子系が実現すれば、光子レベルの超微弱伝播光を操作する

共鳴非線形光学過程を様々に設計し実現し得る。

更に、ナノ光ファイバー系に共振器を組み込めば、異方的な自然放出や高光学密度原子系の機能は飛躍的に増強でき、物理的にもまた応用技術としても大きなインパクトを与え得る。最近では、ナノファイバー上に周期的な穴構造を直接に加工しファイバーブラッググレーティング (FBG) により反射機能を組み込む技術も確立しつつあり、既に優れたナノファイバー光共振器も実現している。また直接加工法と相補的な方法として、ナノファイバーに外部グレーティングを接触させることにより、ナノファイバーにFBG機能を組み込む方法も確立しつつある。最近ではこの外部グレーティングに不連続欠陥を導入することにより単一モードナノファイバー共振器も実現し、自然放出の大きな増大効果など共振器QED効果も観測されている。

ナノ光ファイバーの方法は単一原子/光子の操作制御法として、その物理的及び技術的基盤は確立しつつあるが、諸機能を媒介する「原子」については更なる発展が必要である。本稿で紹介する研究では「原子」としてレーザー冷却原子系や常温のナノ結晶量子ドット系を用いているが、レーザー冷却原子系は物理的には理想に近いが応用技術展開を考えたとき、その生成/制御の複雑さはネックになるだろうし、量子ドット系は簡便な単一ドット操作や発光量子効率の高さの面で大きな長所を有するが、発光スペクトル幅の広さや発光が点滅するブリンキングなど問題点もある。今後はこれまでに確立してきた実験技術をベースに、理想に近い「原子」系の開発が期待される。

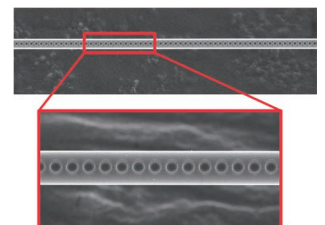
—Keywords—

共振器 QED :

共振器量子電磁力学。原子の光応答は通常無限に広い自由空間の連続分布する電磁場モード中で記述されるが、電磁場モードが離散的となる微小空間では光応答は自由空間とは異なってくる。共振器QEDは微小共振器を用いて電磁場モードを制御し原子の光応答を操作制御する光物理の研究分野。電磁場と原子の相互作用の強さにより弱結合領域から強結合領域まで区分される。弱結合領域では自然放出の操作制御が典型的な効果、強結合領域では真空ラビ分裂等が観測される。最近ではナノ加工技術の発展とあいまって、ナノフォトニック回路に共振器QED効果を組み込む研究が進展している。

ナノ光ファイバー :

通常の単一モード光ファイバーの一部をサブミクロン直径（伝播光の半波長程度）まで極細化した光ファイバー。最細部のナノファイバー領域では光（電磁場）のモード密度集中が起こり、ファイバー周囲の原子の光応答は自由空間と大きく異なってくる。光共振器を組み込めば大きな共振器QED効果が期待できる。



直径 600 nm のナノファイバーに加工されたナノクレータ列。フェムト秒レーザーの単一パルス照射で加工されたもの。クレータ径制御によりナノファイバーに光共振器機能も組み込める。