

平成 25 年 5 月 15 日



報道関係者 各位

大学共同利用機関法人
情報・システム研究機構 国立情報学研究所
最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」

電流励起によるボーズ・アインシュタイン凝縮体の生成に成功 —世界初の電流注入型物質波レーザーを実現—

情報・システム研究機構 国立情報学研究所(以下 NII、所長:喜連川 優)の山本喜久教授とその研究チームは、政府の最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」において、半導体マイクロ共振器中の励起子ポラリトンの電流励起によるボーズ・アインシュタイン凝縮の連続生成に成功しました。この研究は米国・スタンフォード大学とドイツ・ウルツブルグ大学の研究チームとの共同研究成果です。

位相の揃ったコヒーレントな光を発生するレーザーは、光通信や光計測技術を初め現代社会に欠くことのできない基本技術ですが、今回の実験は位相の揃ったコヒーレントな物質を発生するいわば物質波レーザーの開発と呼ぶべきもので、量子コンピューターや量子シミュレーター、さらには量子計測技術の実現に道を拓くものです。

- 本研究成果は 5 月 16 日付 Nature 誌に掲載される予定です。

論文タイトル : An electrically pumped polariton laser

電流励起ポラリトンレーザー

著者: Christian Schneider, Arash Rahimi-Iman, Na Young Kim, Julian Fischer, Ivan G. Savenko, Matthias Amthor, Matthias Lermer, AdrianaWolf, Lukas Worschech, Vladimir D. Kulakovskii, Ivan A. Shelykhs, Martin Kamp, Stephan Reitzenstein, Alfred Forchel, Yoshihisa Yamamoto & Sven Höfling

【背景】

1925 年にアルバート・アインシュタインにより、理論的に予測されたボーズ・アインシュタイン凝縮は、その予言から 70 年という歳月を経て 1995 年に、コロラド大学のエリック・コーネル、カール・ワイマン、MIT のウォルフガング・ケテレーの 3 人により初めて実現されました(2001 年ノーベル物理学賞)。これはルビジウム原子やナトリウム原子といった本来は物質であったものが、量子力学の予言どおり、低温では位相の揃った波として振舞う物質波になり得ることを実証した最初の実験でした。しかし、このコヒーレントな物質波をレーザー光のように連続波として生成し、外に取り出すことは現在に至るまで成功していません。また、原子のボーズ・アインシュタイン凝縮体の生成には大きな真空装置と複雑な光学実験系が必要であり、この事実がボーズ・アインシュタイン凝縮体の量子コンピューター・量子シミュレーター・量子計測技術への応用上の制約を与えていました。

そのため、半導体チップ上に集積化された小型装置であり、直接電流励起によりコヒーレントな物質波を連続して発生することのできる量子デバイスの開発が長年望まれていました。

【今回の成果】

NII-スタンフォード大学-ウルツブルグ大学の共同研究チームは、この課題を解決する手段として、半導体 pn 接合を介して量子井戸と呼ばれる半導体薄膜に電子とホールを注入するデバイスを開発しました。電子とホールはクローン引力により束縛され、励起子と呼ばれる“水素原子”様の複合粒子を形成することに着目しました。(量子力学のスピン統計理論によれば、電子とホールはフェルミ粒子ですが、励起子はボーズ粒子となります。)しかし、励起子はその質量が重く、実現困難な極低温に冷却しない限り、ボーズ・アインシュタイン凝縮を実現できないことが過去 50 年にわたる研究の結果分かっていました。この困難を解決する手段として、研究チームでは励起子を 2 次元の量子井戸に閉じ込めて冷却し易いようにし、合わせて半導体マイクロ共振器の電磁波と強く結合させることにより励起子の質量を 1/10000 以下に軽くするという手法を採用しました。研究チームは、このようにすれば、ボーズ・アインシュタイン凝縮を 10000 倍高い温度で実現できるという事実を発見し、この理論的予測をまず 1996 年に発表しました[Physical Review A53, 4250, 1996]。電磁波と強結合した励起子はポラリトンと呼ばれています。更に 2002 年には、この理論的予測を実証する実験を光パルス励起で成功させました[Science 298, 199, 2002]。また、2007 年には、この光パルス励起のポラリトン・ボーズ・アインシュタイン凝縮体を用いて超流動現象の量子シミュレーション実験にも成功しました[Nature 450, 529, 2007]。

今回、研究チームは特殊な pn 接合を有する半導体マイクロ共振器を開発し、ポラリトン・ボーズ・アインシュタイン凝縮体を電流励起で実現することに世界で初めて成功しました。この実験では、ポラリトン・ボーズ・アインシュタイン凝縮体は連続して生成・取り出され、物質波レーザーとしての機能を全て揃えることになりました。

今回の実験の成功は、小型で高速な量子情報処理デバイスの開発に道を拓くものです。

【今後の展望】

今回の実験は波長 0.8 ミクロン帯の近赤外電磁波と強結合した GaAs 量子井戸励起子がつくるポラリトンを用いて行われましたが、波長 0.4 ミクロンの可視電磁波と強結合する GaN 量子井戸励起子がつくるポラリトンや波長 5~10 ミクロンの中赤外電磁波と強結合するバンド内電子分極がつくるポラリトンへの展開も可能であり、コヒーレントな物質波レーザーが光のレーザーと同様、広範囲な波長領域で実現されていくものと期待されます。また、これらの様々な波長域の電流励起型ポラリトンレーザーは量子コンピューター・量子シミュレーター・量子計測技術などの分野で実用的な半導体デバイスとして使われる可能性を秘めています。

■ 成果の詳細

今回新たに開発された半導体素子の構造を図 1(a)に示します。励起子を閉じ込める 2 次元平面内に閉じ込めるため、4 層の InGaAs 量子井戸が 1 波長共振器となる GaAs(厚さ 281-nm)層の中央に埋め込まれています。その両側を GaAs(厚さ 64-nm)層と AlAs(厚さ 71-nm)層を交互に 23 ペア/27 ペアそれぞれ並べた分布ブラッグ反射器で挟みました。上側の分布ブラッグ反射器は p 型、下側の分布ブラッグ反射器は n 型半導体となるように $1 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のドナー不純物、アクセプター不純物をドーピングしています。それ以外に、GaAs と AlAs の界面には面密度 10^{12}cm^{-2} のデルタドーピングが施され、pn 結合の電気抵抗を極限まで下げています。その後直径 $20 \mu\text{m}$ の円柱状に ECR ドライエッチング法で加工された後、特殊な絶縁体で周囲を埋めてプレーナ化し、最後にリング状の p 型電極とプレーナ状の n 型電極をつけて素子が完成します。

この素子からの反射スペクトルは図 1(b)に示されています。低エネルギー側のディップは下方ポラリトン、高エネルギー側のディップは上方ポラリトンの共鳴エネルギーを示しています。各データは異なった位置に作製されたデバイスに対応しています。両者が最も接近した地点でのエネル

ギー差は 5.5meV であり、共振器の光損失による共鳴エネルギー幅 0.224meV(図 1(c))よりも十分に大きくなっています。このことから量子井戸中の励起子が光共振器中の電磁波と強結合を起こし、ポラリトンが形成されていることが分かります。

この素子に電流を流すと低エネルギー側の下方ポラリトンで発光が起こります。この時、直流磁場を量子井戸層に垂直な方向に印加すると、図 2 に示すように、右回り円偏光と左回り円偏光を持つ 2 つの発光ピークに分裂します。これは量子井戸中の励起子が直流磁場によりゼーマン分裂を起こすために現れる現象であり、励起子と電磁波の強結合が起きている有力な証拠です。

この時素子に流す電流を増やしていくと、図 3 に示すように、電流密度 75A/cm² の時に光出力が急激に増加(ジャンプ)します。この点がポラリトンのボーズ・アインシュタイン凝縮のしきい値(相転移点)です。この点において、右回り円偏光と左回り円偏光の発光ピークにはゼーマン分裂が残っていて強結合が維持されていることがわかります。更に電流を増加し、電流密度が 180A/cm² に達すると 2 度目の光出力のジャンプが観測されました。この点では右回り偏光と左回り偏光のゼーマン分裂が消えており、この第 2 のしきい値ではポラリトン凝縮体が通常的光子レーザーヘクロスオーバーを起こしたものと解釈されます。第 1 のしきい値以上でゼーマン分裂が見られること、第 2 のしきい値(光子レーザーへのクロスオーバー)が見られることから、今回開発された素子で電流励起によるポラリトン・ボーズ・アインシュタイン凝縮体が世界で初めて実現されたことが確認されました。

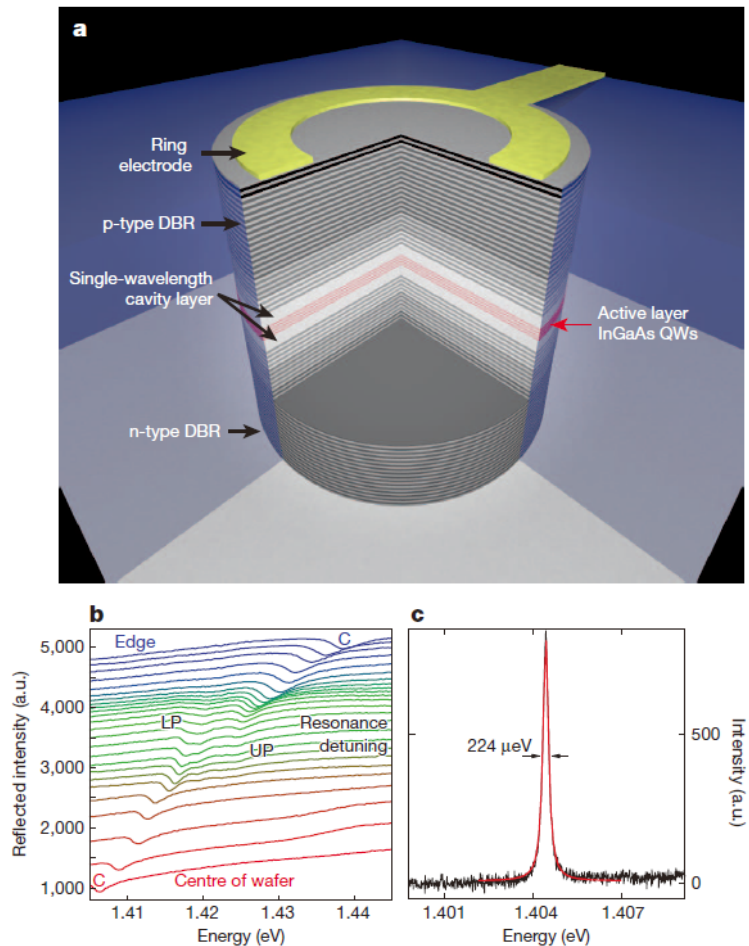


図 1(a):電流励起型ポラリトンレーザーの素子構造。(b)反射スペクトルのマッピング。上方、下方ポラリトンが 5.5meV のエネルギー分裂を起こしている。(c)共振器の光損失による共鳴エネルギーのエネルギー幅。

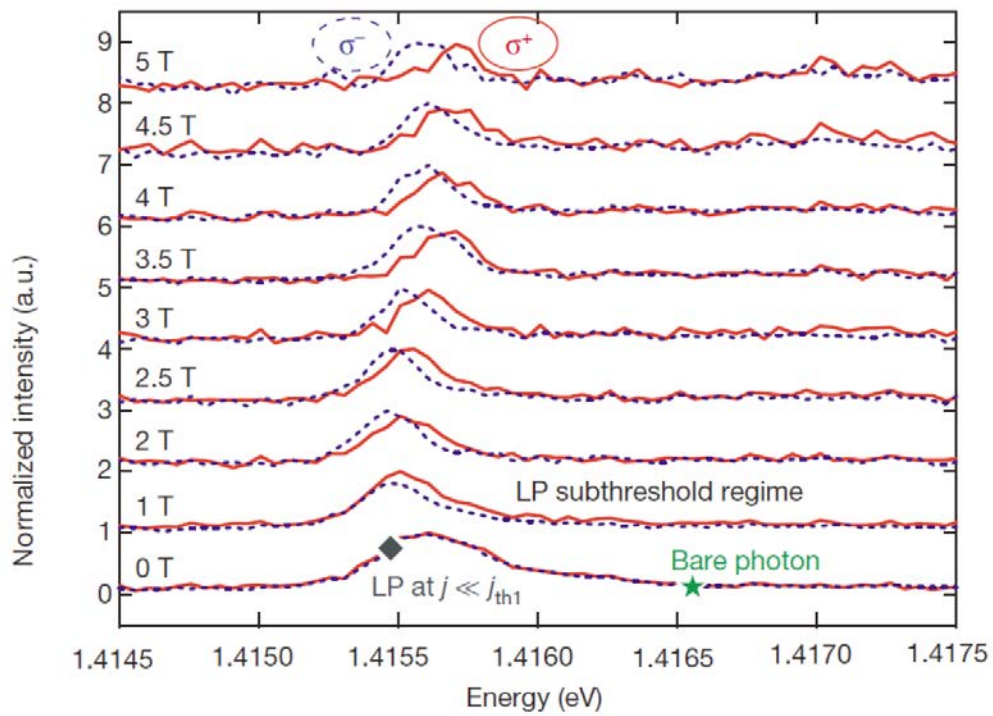


図 2: 電流励起による下方ポラリトン発光スペクトルの磁場依存性。磁場 $B=5\text{T}$ (テスラ) で右回り円偏光、左回り円偏光の発光ピークは $120\ \mu\text{eV}$ ゼーマン分裂している。

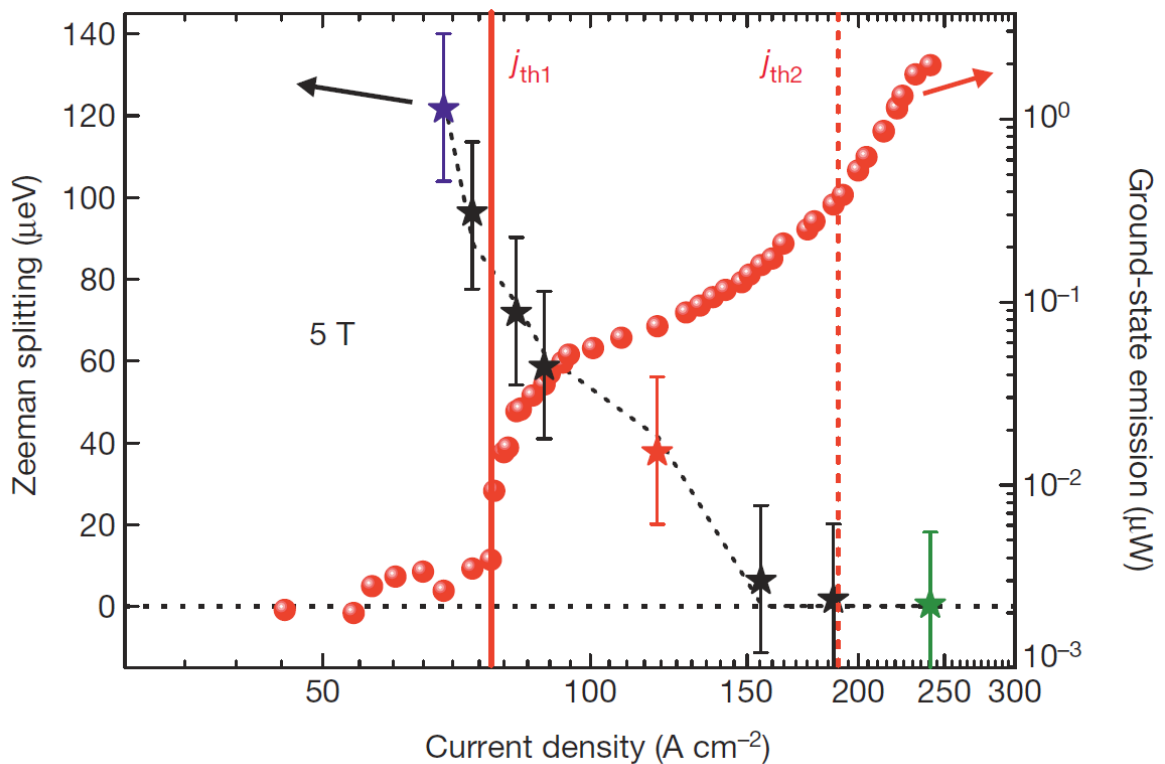


図 3: 下方ポラリトンの発光強度とゼーマン分裂対注入電流密度。

用語解説

- ボーズ粒子とフェルミ粒子

整数スピンを持つ光子(スピン 0)やグルーオン(スピン 1)のような粒子は、1つの状態に多数の粒子を配することができ、ボーズ粒子と呼ばれています。一方、 $1/2$, $3/2$, $5/2$...などのスピンを持つ電子やニュートリノは1つの状態に1粒子しか配することができず、フェルミ粒子という別の粒子群に属します。偶数個のフェルミ粒子からなる複合粒子はスピンが整数となるため、ボゾン粒子として振舞うことが知られています(スピン統計理論)。電子とホールからなる励起子やプロトンと電子からなる水素原子はそのような複合ボゾン粒子の例です。

- ボーズ・アインシュタイン凝縮

励起子や水素原子のようなボーズ粒子を低温・高密度の条件に置くと、全ての粒子が運動エネルギー最小の基底状態に集まる現象です。現代物理学では、ヘリウム液体が低温で示す超流動、金属や絶縁体が低温で示す超伝導は、複合ボーズ粒子であるヘリウム原子や電子(クーパー)対がボーズ・アインシュタイン凝縮を起こした結果であると理解されています。

- ポラリトン

半導体量子井戸中の励起子が、半導体マイクロ共振器中の電磁波(光子)と強く結合を起こすと、励起子と光子の複合粒子であるポラリトンが生成されます。ポラリトンは励起子に比べて、その質量が1万分の1と軽く、励起子に比べ1万倍高温でボーズ・アインシュタイン凝縮を起こします。

- ゼーマン分裂

原子から放出される電磁波のスペクトルが磁場のないときには単一波長であったとします。しかし直流磁場を印加すると、発光スペクトルは複数の線に分裂します。これは原子が、荷電粒子である電子や原子核から構成されていることの証拠の1つです。この現象の発見により1902年ゼーマンとローレンツは第2回のノーベル物理学賞を受賞しました。今回の実験においても、発光スペクトルがゼーマン分裂を起こしていることから、電子とホールから構成される励起子ポラリトンがボーズ・アインシュタイン凝縮を起こしていることが確認されました。

【研究に関する問い合わせ先】

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系

教授 山本 喜久(ヤマモト ヨシヒサ)

E-mail: yyamamoto@nii.ac.jp

Tel: 03-4212-2506

Fax: 03-4212-2641

【報道に関する問い合わせ先】

国立情報学研究所

広報チーム 坂内 範子

Tel: 03-4212-2164

Fax: 03-4212-2150

E-mail: bannai@nii.ac.jp