電気ポンピング式ポラリトンレーザ

新しいタイプの低出力半導体レーザは、重要なマイルストーン、最初の電気ポンピング動作に達した。2013年5月15日に数時間の差で出版されたNature誌とPhysical Review Letters誌に、2つの研究グループが極めて類似したデモンストレーションを発表した[(1)、(2)]。どちらのグループもその論文を見るまで互いに相手グループの成功を知らなかった。

1996年にスイス連邦工科大学のアタク・イマモーグル（Atac Imamoglu）氏は、半導体内の光子と電子正孔対（励起子）との相互作用によって形成された準粒子であるポラリトンからコヒーレントな単色光を抽出するコンセプトを提案した。ポラリトンはボソンであるため、多数が同じ量子状態を占め、ボース・アインシュタイン濃縮体に類似した濃縮体を形成することができる。これらの状態にあるポラリトンはサブナノ秒の寿命を持ち、光子を放出して自然崩壊する。凝縮体中のすべてのポラリトンが同じ量子状態を占めるので、放出される光子はコヒーレントで、単色である。

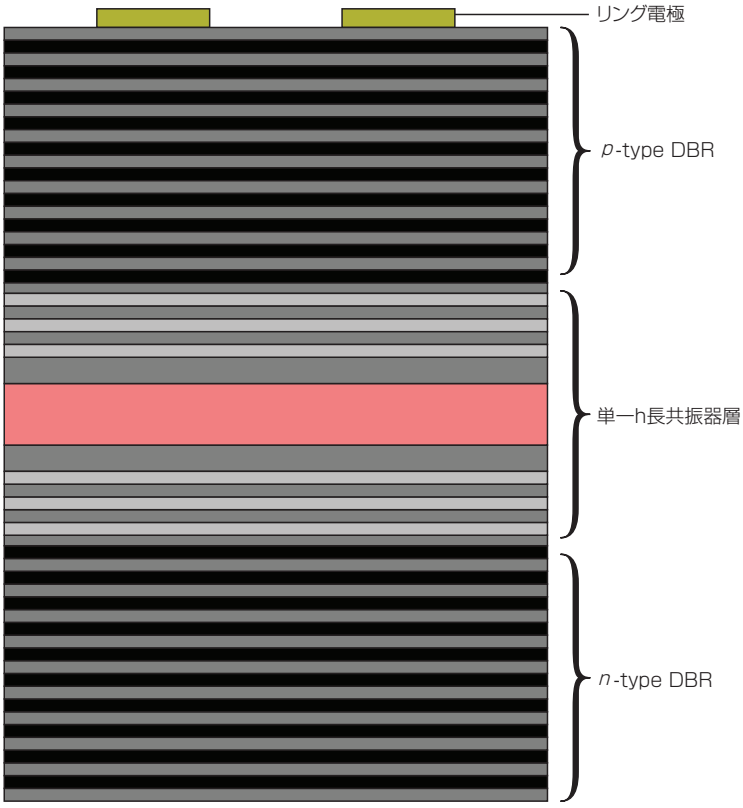

図1　電気ポンピングされるポラリトンレーザの断面図を示した。その構造は上部金リング電極と直径20μmのマイクロピラーとから成り、分布ブラッグ反射体（DBR）によってサンドイッチされた活性層を持つ。活性層は4つのInGaAs量子井戸を含む。

潜在的な高効率

理論予測によれば、ポラリトンレーザは低出力で高効率であり、光インターコネクションなどの用途に魅力的である。英サウサンプトン大学のアレクシー・カボキン氏（Alexey Kavokin）は、ポラリトン機構は反転分布を必要としないと言う。「それゆえに、われわれは、従来の半導体マイクロレーザに比して、しきい値が多数ケタ低くなると期待している」と指摘する。ポラリトンは超高速も約束する。最初のポラリトンレーザが極低温に冷却された半導体微小共振器の光ポンピングによって実証されてから、ちょうど2年後のことだ。2007年に、カボキン氏のグループは室温での光ポンピングを初めて実証した[(3)]。

これを電気ポンピングへシフトさせるには、大きな変革が必要だ。まず、ドーピングによって、*p-n*接合を形成し、電流を流すための微細構造を作製した。実験用として論理にかなった半導体はヒ化ガリウム（GaAs）である。なぜならば、技術的開発が十分に進み、ポラリトン発光ダイオードが2008年に開発されたからだ[(4)]。しかし、コヒーレントな単色光を放射し、その光がレーザ様の微小共振器ではなくポラリトン由来であるという説得力のある証拠を示すデバイスが開発されるまでには長い年月を要した。

1つの重要な問題はポラリトン励起と凝縮過程の性質であった。「それは励起子ポピュレーションを発生する電子正孔プラズマを作ることで開始し、次いで、これらの励起子が共振空胴内で光子と結合してポラリトンを生成する」と、Physical Review Letters誌にこのアプローチを投稿した研究グループのリーダである、米ミシガン大学のパラブ・バッタチャリヤ氏（Pallab Bhattacharya）は語っている。しかし、1つのボトルネックが最低ポラリトン

エネルギー準位へのポラリトンの散乱において起こり、その結果、コヒーレント発光に必要なレベルにあるポラリトンの大きなコヒーレントポピュレーションが阻まれた。この問題を、両グループは数テスラの強磁場を印加して散乱を強化させることで解決した。これはポラリトンレーザ作用の実証にも役立った。

冷却の必要性

バッタチャリヤ氏は、もう1つの問題は、GaAs中では励起子結合エネルギーが相対的に弱いので、励起子が室温以下で崩壊し、ポラリトン発光が抑制されることだ、と指摘した。この問題は、GaAs微小共振器を10～30Kの温度に冷却することで克服された。低温は明瞭にその物理特性を示したと、Nature誌にアプローチを投稿したグループのリーダである、独ウルツブルグ大学のスベン・ホフリング氏（Sven Höfling）は語っている。より高い温度で動作させるには窒化物またはII-VI化合物などのより広いバンドギャップの半導体が必要になるであろう。

実験が実際にポラリトンレーザ発振を起こしたことを証明することは、微小共振器ダイオードがVCSELと非常に良く類似し、レーザに似た効果を引き起こす可能性がある共振空胴を含むため挑戦であった。ホフリング氏は、彼のグループが、弱く結合した微小共振器レーザではなく、ポラリトン過程由来の非線形発光を観測したのだと、レフェリーを納得させるのに2年以上かかったと語っている。「われわれは磁場なしで（ポラリトンの）すべてのシグナチャーを観測した」と彼は言うが、しかし、彼らは観測を確実にするために、磁場を加えなければならなかった。バッタチャリヤ氏は、自分たちのグループの証拠が確実といえるか否かが心配で眠れない夜が数日間続いたと回想している。独立した両誌への同時掲載の結果が証しになった。

コヒーレント出力光子がコヒーレントポラリトン状態から自然放出によって生成されたと厳密に説明するには、いぜんとして、いくつかの理屈が必要になる。バッタチャリヤ氏は、このプロセスを「ポラリトンの誘導散乱による光増幅（LASSP）」と称しているが、ポラリトンレーザがLASSPになるか否かはいまだ定かでない。

両グループは、次のステップは、実用化に向けて必要なより高い温度、究極的には室温で電気ポンピングを実証することであると言う。それには窒化ガリウムまたは酸化亜鉛などの広バンドギャップ半導体への切り換えが必要だ。成功すれば、低電力消費量が重要になる光インターコネクション、スイッチ、論理ゲートなどの用途にポラリトンを使用する道が開かれるであろう。カボキン氏は、ポラリトンがテラヘルツ周波数をも発生するであろうと示唆している。そして、ホフリング氏は、ボース・アインシュタイン凝縮体と類似であるが、生成と利用がかなり容易なポラリトン凝縮体を室温電気励起によって生成することを望んでいる。（Jeff Hecht）

参考文献

(1) C. Schneider et al., Nature, 497, 348 (May 16, 2013); doi:10.1038/nature12036.
(2) P. Bhattacharya et al., Phys. Rev. Lett., 110, 206403 (2013); doi: 10.1103/PhysRevLett.110.206403.
(3) S. Christopoulos et al., Phys. Rev. Lett., 98, 126405 (2007).
(4) S. I. Tsintzos et al., Nature, 453, 372 (May 15, 2008); doi:10.1038/nature06979.

LFWJ

SPI® Lasers

溶接・切断・
マーキング・・・
微細加工に最適の
ファイバーレーザー

パルスファイバーレーザー
【redENERGY G4シリーズ】

最大70W
ビームエキスパンダーは、
ワンタッチで取外し・交換可能

S：Single Mode M2＜1.3
20ミクロン以下の微細加工に最適
L：Low Mode M2＜2
マーキング用途に最適
H：High Mode M2＜3.2
幅の広いライン加工、高速加工に最適

CW ファイバーレーザー
【redPOWER OEMモジュール】
500W、750W、1000W

【redPOWER スタンドアローンタイプ】
20W～500W

http://www.japanlaser.jp/
E-mail:indus@japanlaser.jp
JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー
本　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0863（直）
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711