

低次元半導体レーザーの低しきい値光学利得と高速光非線形性

研究代表者： 秋山英文（東大物性研）

研究分担者： 横山弘之（東北大未来科学技術共同研究センター）

本計画研究では、界面品質や構造均一性が著しく高く非常にシャープな発光線幅を有する半導体1次元量子細線および2次元量子井戸と、pn接合ダイオード・電界効果トランジスタ・光導波路・光共振器などのデバイス構造を組み合わせ、高品質かつ高度に制御された低次元半導体レーザーを構成し、クリーン低次元電子正孔系の光学応答における多体動的電子相関効果を、電子および正孔の濃度、キャリア温度、光子系との結合を精密に評価・制御しつつ調べることを目指している。これにより、従来の電流注入のみあるいは光励起のみにより形成される電子正孔系では得られなかったような、平衡、定常準平衡、そして非平衡の電子系・正孔系・電子正孔系を任意の濃度かつ温度で調べ、そして、興味ある多様な動的電子相関相・光学応答特性や、それらを制御して得られる新しい光機能を探索している。

具体的には、T型量子細線レーザー(FIG. 1)の研究において、これまでの最低しきい値電流 0.27mA を下回る低しきい値化を目指すと共に、バランスおよびインバランスの場合の電子系・正孔系・電子正孔系の利得特性を任意の濃度かつ温度で調べることを目指し、まず、ハートリーフォック近似理論をもちいて利得特性・スペクトルの計算を行った。実験では、従来の物性物理研究分野で行われてきた光励起のみ、あるいはデバイス開発評価の現場で行われてきた電流注入のみといった、限られた励起方法により形成される電子正孔系では得られない状況を制御して作り出すために、電流注入型のT型量子細線レーザーに対して、立体的な光学励起配置を工夫して、光励起を併用できるようにした。そして、実際に、光励起により等濃度の電子正孔対を付加することで、様々な濃度の電子および正孔が注入された際の利得を計測した。

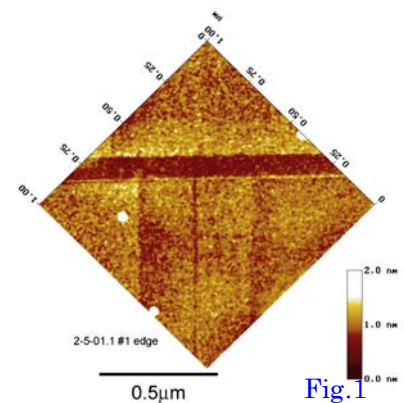


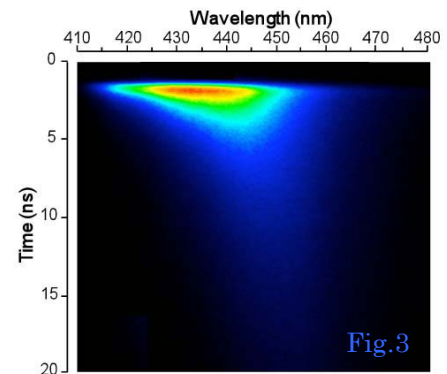
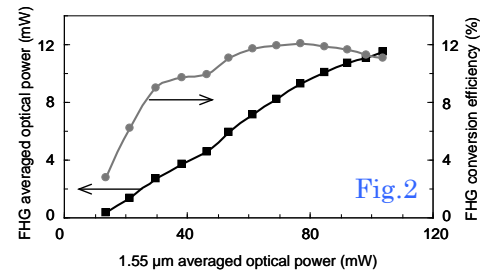
Fig.1

また新たに開発した 1.5 μm 通信波長帯の分光計測システムを用いて、1.5 μm 帯埋め込み型量子井戸レーザーでしきい値電流が室温で 5mA、低温 100K で 0.3mA という高品質なデバイスを東工大荒井・西山研究室より得て、その利得特性・スペクトルの温度依存性を計測した。ハートリーフォック近似で電子間相互作用の効果を取り入れた光学スペクトル計算と比較した。利得ピークから化学ポテンシャルエネルギー近傍のスペクトル形状は実験理論で良い一致が得られたが、利得ピークから低エネルギー側のバンド端テール部分の形状は著しく差異があった。

半導体レーザーにおける電子正孔系の光学応答を研究する上では、キャリア温度の評価が重要なので、ケナード・ステファノフ関係式 (KS 関係式) という基礎関係式を用いることでその温度評価を行った。KS 関係式の成立条件が比較的達成されやすいと期待される n 型ドープ 2 次元量子井戸系において実験を行い、モデルに拠らずにキャリアの絶対温度がきちんと評価できることを確認した。

さらに、レーザーの活性層に用いる種々の非ドープ2次元量子井戸に対する実験を進めている。

分担者横山のチームでは、高速非線形現象観測のための光源・測定系の整備に重点をおいて研究を進めてきた。第一に、ワイドギャップ半導体レーザーの非線形光学効果を調べる目的で電氣的同期が可能な紫外線領域のピコ秒パルス光源の開発を進めた。高速応答の1.55 μm 帯DFB-LDの利得スイッチング(GSW)動作により、数psから数十psまで光パルスの時間幅を制御できることを確認し、その光パルスを低非線形光ファイバ増幅器により増幅し、周期分極反転構造を有するMgO添加LiNbO₃結晶(PPMgLN)により波長774nmの第2高調波(SHG)光に変換し、さらに周期分極反転構造を形成したKTiPO₄結晶(PPKTP)により波長387nmの第4高調波(FHG)光に変換し、最終的に繰り返し周波数10MHz、最大平均パワー12mW、最大ピークパワー200Wを得た。次いで、この電氣的同期可能なFHG紫外光パルスを励起光として、InGaN量子井戸の発光のピコ秒時間分解分光を行なった(FIGS. 2, 3)。一方、半導体レーザーのGSW動作で数ps時間幅の光パルス発生が可能なことは実験的に実測している現象であるが、そのメカニズムには現在でも必ずしも明らかではない。そこで、このメカニズムに迫るための実験データの取得を進めた。過渡的な高密度キャリア励起下でのバンド充填と屈折率変化などの機構を検討中である。上記の時間分解分光の実験もメカニズム考察の上で重要な知見を与えるものである。



参考文献

- [1] T. Ihara, S. Maruyama, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Thermal-equilibrium relation between the optical emission and absorption spectra of a doped semiconductor quantum well", *Phys. Rev. B* **80**, (2009) 033307.
- [2] S. Maruyama, T. Ihara, H. Itoh, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer and K. W. West, "Micro-photoluminescence excitation spectroscopy on asymmetric absorption line shapes of weakly localized excitons in a quantum well", *Solid State Communications* **147**, (2008) 114.
- [3] S. Inada, M. Yoshita, M. Okano, T. Ihara, H. Akiyama, and L. Zhang, "Measurements of cavity-length-dependent internal differential quantum efficiency and internal optical loss in laser diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, (2008) 2288.
- [4] H. Yokoyama, S. Kono, and A. Sato, "A 200-W peak-power ultraviolet picosecond light pulse source based on a gain-switched 1.55 μm laser diode," *Nonlinear Optics 2009*, NThC6, Honolulu, July, 2009.
- [5] H. Yokoyama, "Semiconductor lasers enable advances in nonlinear biophotonics," *SPIE Newsroom, Lasers & Sources*, April, 2008, (<http://spie.org/x23637.xml?highlight=x2404>).