

スピンエレクトロニクスデバイス応用に向けたInGaN量子ドットの特性

M. Senes K.L. Smith S.E. Hooper J. Heffernan

Sharp Laboratories of Europe, Ltd.

原論文

“electrical control of the exciton spin in nitride semiconductor quantum dots”, Applied Physics Letters, Volume 94, page 223114, 4 June 2009

室温までの条件下で外部電界の印加によりInGaN量子ドット*1内の励起子スピン*2を初めて実験的に操作したので報告する。さらに、励起子のスピン緩和が温度に依存しないこともわかった。本結果は、将来、窒化物半導体量子ドットを実用的な室温スピントロニクス*3デバイスに利用する上で非常に有望である。本編では特に、本量子ドットを用いたスピンLEDや半導体レーザの実現に関して論じる。

*1 量子ドット

およそ50nm以下の非常に小さい半導体粒子で、電子または正孔を3次元全ての方向で閉じ込めることができる。

*2 励起子

半導体中のクーロン力によって束縛された電子と正孔のペア。励起子は半導体中に光子が吸収されることにより生成される。

*3 スピントロニクス

固体デバイス中の電子のスピンを活用する工学技術。

*4 電子スピン

電子の回転方向あるいは角運動量の向きによって定まる電子の特性。

*5 ウルツ鉱型

六方晶系の結晶構造の一つ。GaNのような窒化物半導体で一般的な安定した結晶構造。

*6 透過電子顕微鏡

非常に薄い試料に電子ビームを透過させ、試料との干渉作用によって検査する顕微鏡。

*7 原子間力顕微鏡

非常に高解像度な走査型プローブ顕微鏡。

*8 ストリークカメラ

光の強度の時間的な変化を測定する機器。時間分解能は一般にピコ秒単位の精度を持つ。

電子スピン*4 (スピントロニクス) に基づく新しい機能デバイス (例えば、偏光LEDや次世代トランジスタ、量子情報技術) の将来の可能性を考えた場合、半導体量子ドット内の電子または正孔のスピン状態の操作が大きく注目される。一般に極低温では量子ドット構造内のキャリア閉じ込め効果による散乱過程の抑制は、スピン寿命の延長につながる ($T < 10K$ でmsオーダー)。しかし、III-V族ないしはII-VI族の半導体量子ドット内のスピン寿命は温度上昇に伴い急激に減少するため、残念ながら実用的な商用スピントロニクスデバイスに応用できる可能性は小さい。一方、III族窒化物半導体材料 (例えばInGaN) は、その広いバンドギャップ、小さいスピン軌道カップリングおよび強い励起子結合エネルギーなどのユニークな特性により、室温においても電子または励起子のスピンの長い寿命が期待されている。ただし、本材料系ではスピンに関する報告は、まだほとんど行われていない。

本論文では、さまざまな温度でウルツ鉱型*5 InGaN量子ドットでの励起子スピンの特性を慎重に調査し、さらに、室温に至るまで外部電界の印加により励起子のスピンを制御できたことについて報告する。

外部電界の印加による励起子のスピン配向への影響を調査するために、図1の

ようにp-i-n構造内に量子ドット層を埋め込んだ。このデバイスは分子線エピタキシー法 (MBE) により成長し、p-i-n構造内に埋め込まれた6nmのGaN層で隔てられた5つのInGaN量子ドット層からなる。GaNで覆われたInGaN量子ドット層上の断面のZ-コントラスト走査型透過電子顕微鏡*6および同一の覆われていないサンプルでの原子間力顕微鏡*7での測定により、このInGaN量子ドットは平均的に高さ2nm、直径15nm、インジウム含有率約15%、密度約 10^{11} cm^{-2} を持つものと判った。この量子ドットは直線偏光された周波数通倍Ti:Saレーザーにより励起される。発光の直線偏光角はストリークカメラ*8システムにより記録し、量子ドット内の励起子のスピンの

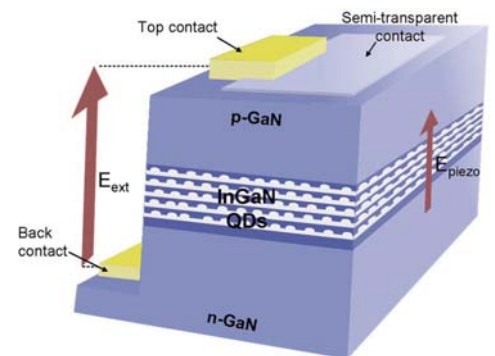


図1 InGaN量子ドットを含むp-i-n構造の三元模式図

配向を直接映し出した。

図2(a)は異なる温度下で時間を関数とした場合の発光の直線偏光度を示す。フォトルミネセンス信号がサンプル表面で拡散したレーザー光で遮られなくなった500ps経過後、直線偏光は完全に一定になっている。つまり電子スピンの正孔スピンの励起時のスピンの配向を失っていない。

最近、立方晶GaN/AlN量子ドットでも類似の結果が確認されているが、これらはInAs, CdTeあるいはCdSe半導体材料からなる他の量子ドットシステムで得られた結果とは対照的である。後者に挙げた量子ドットの減衰時間は通常T=10Kの励起寿命より長い、温度が数十度増しただけで激減する。いずれの温度でも、本論文で検討したInGaN量子ドットでの励起子のスピンの減衰時間は10nsより長いと見積もられる。これは過去報告されたウルツ鉱型窒化物半導体構造、特にInGaN量子ドットの中で最も長い偏光減衰時間である。

以下、外部電界下のPLの直線偏光度の温度依存性を解析する。まず、100Kで外部電界を印加した場合、約15%の一定の割合で励起子のPL直線偏光が見られた(図2(a))。電界を印加した場合、ほぼ半分の直線偏光の明確な減少(図2(b)参照。およそ8%)が記録された。逆バイアスを加えた際の直線偏光の減少は外部電界の印加による励起子のスピンの操作の直接の証拠である。次に、図2(b)で示されているように、直線偏光は室温までのいずれの温度でも、エラーバーで示されている範囲のすべての値で、電界が印加された時は印加されない時の記録値より常に低い値に留まっている。

我々の実験結果は、InGaN量子ドットを用いたスピンLEDまたはスピンレーザーの可能性を実証している。確かに、現状のスピンLEDは非常に低い温度(<30K)では高い偏光発光(90%以上)を示すが、室温では偏光発光が良くない。これは温度が増加するとキャリアのスピンの緩和時間がキャリア再結合時間より

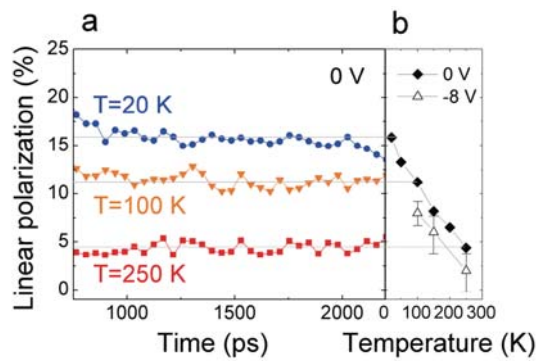


図2 (a) 3つの温度に対するPL直線偏光の時間依存性 (T=20, 100, 250 K-Eexc=2.85 eV, Edet=2.753 eV, 0V)
(b) 温度と印加された外部電界の関数としての直線偏光の依存性

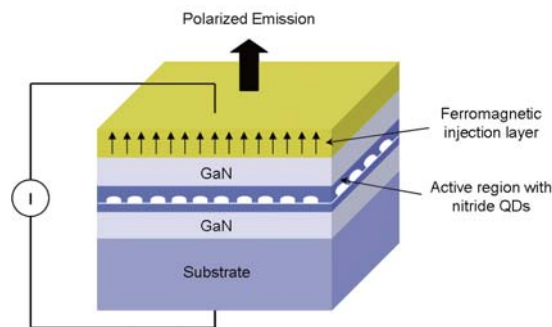


図3 窒化物量子ドットを持つスピンLEDの三次元模式図

ずっと短くなるためである。(スピンLEDとは、図3に示すように活性領域にスピン偏光したキャリアの電氣的注入により偏光を発するLEDである)窒化物量子ドットのキャリアスピンの緩和時間が温度によって変化せず、室温でもキャリア再結合時間より長く維持することを見出したため、窒化物量子ドットは室温でも高偏光発光を示す実用的なスピンLEDにつながるものと確信している(室温でのキャリア再結合時間は我々の量子ドットで400psだったのに対し、スピン緩和時間は15nsより長いと見積もっている)。

結論として、InGaN量子ドットにおける室温までの励起子のスピンの緩和抑制について初の実験結果を得た。また、外部バイアスの印加によりp-i-n LEDでの励起子のスピンの光学配向を制御する可能性を実証した。本結果は室温で動作するスピンLEDなどの実用的スピントロニクスデバイスの将来の実現に有望であると確信している。

(和訳: ヨーロッパ研究所 技術企画室)