

## 時間分解二光子光電子分光法を利用した InGaN/GaN 量子井戸の励起電子緩和寿命の評価

### Characterization of carrier lifetime in InGaN/GaN quantum wells using time-resolved two-photon photoemission spectroscopy

阪大院工<sup>1</sup>, 阪大電顕センター<sup>2</sup> ◦市川 修平<sup>1,2</sup>, 藤原 康文<sup>1</sup>, 保田 英洋<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Osaka Univ., <sup>2</sup>Research Center for UHVEM, Osaka Univ.,  
◦Shuheichikawa<sup>1,2</sup>, Yasufumi Fujiwara<sup>1</sup>, Hidehiro Yasuda<sup>1,2</sup>  
E-mail: ichikawa@mat.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】半導体中のキャリア再結合過程の評価手法として、一般に時間分解フォトルミネセンス(TRPL)法があるが、この評価手法は励起キャリアの再結合過程で生じるバンド端発光を検出信号として利用するため、欠陥へのキャリア捕獲速度が極めて速くバンド端の発光が殆ど観測されない場合や、欠陥発光とバンド端発光が混在する場合には、キャリア寿命測定が困難になる。本研究では、紫外光電子分光測定において、フェムト秒レーザをポンプ・プローブ光に用いた時間分解二光子光電子分光測定系(Tr-2PPE)を構築することで、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN 量子井戸(QW)に励起された電子の緩和過程を、バンド端発光を得ることなく検出することを試みたので報告する。

【実験・結果】(0001)サファイア基板上に有機金属気相成長法により In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN 多重量子井戸構造を 2 種類作製した。X 線回折測定の結果から、それぞれの試料の In 組成  $x$  は 0.22 と 0.25 であり、井戸幅は 2.1 nm と 5.9 nm であった。いずれの試料も室温では非輻射再結合が支配的であり、井戸幅 5.9 nm の試料では室温下のフォトルミネセンス測定でバンド端発光が殆ど得られなかった。励起光源として Ti:Sapp レーザ(パルス幅: ~100 fs, 繰り返し周波数: 80 MHz) を用い、第二高調波(波長 400 nm, 51 nJ/cm<sup>2</sup>)を In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 井戸層のみを選択励起できるポンプ光として用い、第三高調波(波長 267 nm, 7.1 nJ/cm<sup>2</sup>)を光電子放出のためのプローブ光として試料に照射した。各パルスの光路差を制御することで高い時間分解能を有する Tr-2PPE 系を作製した( $\Delta t \sim 6.7$  fs)。ポンプ光とプローブ光は同光軸・同偏光(S 偏光)となるように制御し、真空チャンバー内の試料に照射した。また、キャップ層の GaN 試料表面には真空チャンバー内で Cs を少量蒸着することで電気二重層を形成し、実効的な電子親和力を低減した。光電子の検出には VG SCIENTA 社製 SCIENTA R3000 を用い、光電子分光測定は全て室温で行った。

各試料に対して Tr-2PPE 測定を行い、十分光路差が長いときに得られた光電子スペクトルの平均値からの差分をとることで二光子光電子スペクトルを取得した。井戸幅 2.2 nm の In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>N/GaN QW の差分二光子光電子スペクトルの遅延時間依存性の例を Fig. 1 に示す。図より、遅延時間の増加に伴い光電子強度が減少しており、励起電子が時間共に緩和していることが分かる。Fig. 2 に光電子強度の減衰曲線を示す。図中のプロットと実線はそれぞれ実験値およびフィッティング結果である。図より、いずれの試料においても励起電子の緩和はシングル exponential 型を呈しており、見積もられた緩和寿命は井戸幅 2.2 nm の QW で 120 ps、井戸幅 5.9 nm の QW で 40 ps であった。一般に In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N QW の輻射再結合寿命は ns オーダー以上の値であることから[1]、見積もられた緩和寿命は非輻射再結合寿命の影響を支配的に受けたものであると考えられる。また井戸幅の広い In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N QW では、量子井戸内にかかる内部電界の影響から輻射再結合寿命が長くなる[2]。しかし、本研究で用いた井戸幅 5.9 nm の試料の緩和寿命は井戸幅 2.2 nm の試料の緩和寿命に比べて 3 倍程度短かったことから、欠陥の増加に伴って非輻射遷移確率が増加したことが示唆された。これらの結果から、バンド端発光を伴わない遷移過程が支配的な試料であっても、Tr-2PPE 測定により緩和寿命測定が可能であることが明らかになった。

【謝辞】本研究の一部は、超顕微科学研究拠点事業(2016-2022 年)および JSPS 科研費 (No. 18K13791) の支援を受けて行われたものである。

[1] C. Haller et al., *Appl. Phys. Lett.* **113**, 111106 (2018). [2] F. Bernardini et al., *Phys. Stat. Solidi B* **216**, 391 (1999).

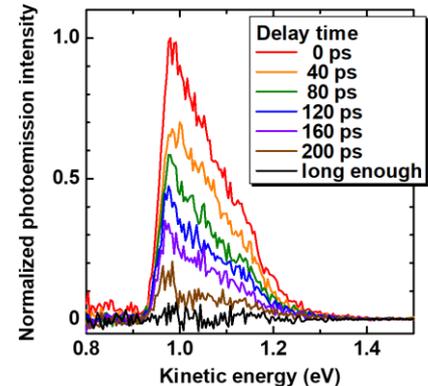


Fig. 1: Time-dependent 2PPE spectra of In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>N/GaN QW at room temperature.

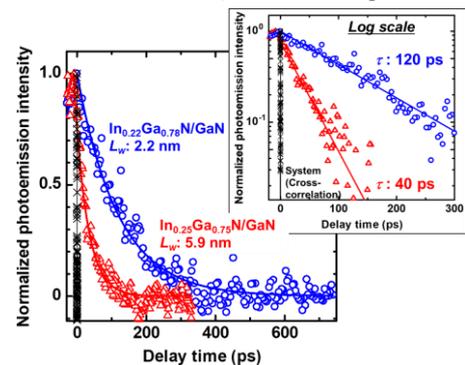


Fig. 2: Tr-2PPE decay curves of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN QWs for excited-electrons near conduction band minimums.