

論文の内容の要旨

論文題目 **Photo-induced absorption effect and its control around 400 nm in InGaN heterostructures**

(InGaN ヘテロ構造における 400 nm 帯光誘起吸収効果とその制御)

野村 政宏

1. 研究の目的と背景

本博士論文は窒化物半導体 InGaN/GaN ダブルヘテロ構造における光誘起吸収効果の特性を詳しく調べ、その効果を用いて二次元光デバイスへの実現を目指して透過率の光制御を行った結果をまとめて考察したものである。

InGaN/GaN ダブルヘテロ構造は格子不整合系であるため構造内に 1 MV/cm オーダーの非常に強いピエゾ電界が存在する。そのため InGaN が吸収する波長 (~400 nm) の光を当てて構造内に多量の電子と正孔を生成すると、内部電界を遮蔽するように電子と正孔が逆のヘテロ界面に分離する。その結果内部電界が弱まると遷移エネルギーが変化するために吸収端近傍で大きな吸収係数の変化が観測される。この光照射によって吸収変化が起こる現象を光誘起吸収効果とよぶ。この効果の存在自体は既に報告されていたが、詳細な研究は行われていなかった。本研究は InGaN/GaN 材料特有の大きな光誘起吸収効果を詳しく研究し、知られていなかった特性を明らかにしてきた。そしてこの効果を用いて新規な光デバイスを提案した。従来の半導体ナノ構造を用いた光デバイスは外部電界を印加して動作させることが基本であり、結晶成長後に複雑なプロセスを要する。一方、提案した光デバイスは内部電場を光制御することで結晶成長後のプロセスを一切必要としない電極不要な素子を青色波長域で実現できる点で特徴的であり、かつ独創的である。この素子の実現に向けて基礎的な光変調特性を評価し、InGaN 材料のポテンシャルを探った。以下、光誘起吸収効果について得られた知見と透過率の光制御に関する結果と考察を具体的に述べてゆく。

2. 光誘起吸収効果について

研究に用いた窒化物半導体構造は有機金属気相堆積法により作製した。まず始めに、InGaN 膜厚が異なる試料でキャリアダイナミクスと光誘起吸収効果の大きさがどう異なるかについて調べた。膜厚 5.5 ~ 66 nm までの四種類の InGaN 膜厚をもつ試料を成長した。主な評価法にはフェムト秒過渡吸収分光法を用い、パルス励起後の過渡的な光誘起吸収変化を観測した。パルス励起後、約 400 ps はバンドフィリング効果によって大きな吸収係数の減少が観測され、キャリア密度が十分に低くなった 2 ns では、パルス光励

起により生成された電子・正孔が空間的に分離されて内部電場を遮蔽し、基礎吸収端近傍での吸収の変化となって現れる様子が観測された(Fig. 1)。最も厚い膜厚 66 nm の試料で最も大きな吸収係数変化 ($\Delta\alpha$) を観測し、 $\Delta\alpha \sim 10,000 \text{ cm}^{-1}$ という大きな値を得た。そのため、素子の構造としては臨界膜厚以下のできるだけ厚い構造が最適との結論を得た。そして InGaN 膜厚 66 nm の試料を用いて光誘起吸収効果について研究を行った。

次に、素子の動作原理となる物理現象、すなわち光誘起吸収効果を詳細に理解するために過渡吸収分光と時間分解フォトルミネッセンス測定によってパルス光励起後のキャリアダイナミクスについて研究した。励起後ナノ秒以内のキャリアダイナミクスは京都大学のグループによって既に研究されていたが、本研究ではナノ秒領域も含め、さらに光誘起吸収変化が完全に緩和する時間スケールまで研究領域を拡張した。その結果、光誘起吸収変化がナノ秒（既知）、およびサブミリ秒（新規に発見）オーダーの異なる二つの物理現象によって緩和することがわかった。光誘起吸収効果がキャリア寿命より5桁も長いサブミリ秒保持される原因は、ガリウム原子の空孔などのバンドギャップ中にある深い電荷捕獲準位であると考えられる。内部電場によって空間的に分離された電子と正孔はそれぞれ逆のヘテロ界面付近に分布する。それらのうち大部分は、非発光または発光再結合過程によって比較的短時間で緩和し、一部は空間分離を保ったまま電荷捕獲準位にトラップされると考えられる。これらの捕獲された電荷が内部電界を長時間遮蔽し、光誘起吸収変化がサブミリ秒程度保持していると考えられる。この初めて明らかになったサブミリ秒オーダーの吸収変化の緩和は、次に述べる点で非常に重要な意味を持つ。強い内部電界の遮蔽には高密度のシートキャリア密度が必要なため、今までは強力なパルス光励起によってのみ励起直後の一瞬だけ吸収変化を誘起できると考えられていた。しかし、サブミリ秒程度保持される吸収変化を利用すればキャリア生成レートの高い連続（CW）光励起でも大きな吸収変化を誘起することが可能で、安価な半導体レーザーで光誘起吸収効果を利用した光デバイスを駆動できる可能性を示唆した。

3. CW 光による透過率の光制御

上記の可能性検討するため、半導体レーザーからの CW 光で誘起される吸収変化を測定した。そして CW 光励起を用いてもパルス光励起の場合に比べて全く遜色ない大きな吸収変化を吸収端近傍で誘起できることを示し、デバイスの駆動光源として高価なパルス光源システムではなく安価で手軽な半導体レーザーを用いることが可能であることを実証した(Fig. 2)。このデバイスの基本動作特性を調べるため膜厚 66 nm の単層 InGaN 試料において波長 405 nm、光強度 1 W/cm^2 の CW 光を励起光に用いて、断続的にオンオフしたときの透過光強度変化を調べた。その結果、透過光強度変調は約 4%となり、変調度が半分に落ちるカットオフ周波数は 300 kHz となった。本光デバイスは二次元的に利用することが期待できるため、フレームレートとして考えた場合非常に高い値であ

ると言える。

さらに大きな透過率変化を得るために InGaN/GaN(60 nm/ 60 nm)の 10 周期構造を作製した。この試料について波長 405 nm の CW 光を励起光に用いて励起光をオンオフしたときの透過光強度変調特性をこの試料の最大感度波長である 398 nm で調べた。励起光が 10 W/cm^2 のとき透過光強度変化は約 30 % (Fig. 3)と非常に大きな値が得られた。カットオフ周波数は励起光強度 1 W/cm^2 において約 30 kHz となった。カットオフ周波数が単層試料と比べて低下した理由は、試料による吸収のため深い位置にある InGaN 膜における励起強度が弱く、早い周波数領域では光誘起吸収効果が完全に立ち上がる前に励起光がオフになるためであると考えられる。しかし、高速でデバイスを駆動したときに透過光強度変調度を低下させる主な原因は光誘起吸収効果の遅い緩和にあるため、何らかの手法を用いて緩和時間を短くすることでカットオフ周波数を引き上げることができる。本研究では、ヘリウムイオンを照射することで緩和時間の短縮に成功し、カットオフ周波数を大きく引き上げることに成功したので次に詳しく述べる。

3. ヘリウムイオン照射による透過率光制御特性の向上

InGaN/GaN(60 nm/ 60 nm)の 10 周期構造を持つ試料に、深さ方向にイオン濃度が均一になるように加速電圧 5 ~ 350 kV で 8 段階ヘリウムイオン照射を行った。照射を行わなかった試料を(A)、ピークイオン濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の試料を(B)、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の試料を(C)としてイオン照射が試料の特性に与える効果について述べる。

フォトルミネッセンス強度は照射量が多い試料ほど小さくなり、時間分解四光波混合実験においてキャリア寿命が短いことを確認した。これはイオン照射によって結晶がダメージを受けて新たに欠陥が導入されたことを示す。試料(A)と(B)で光誘起吸収効果の緩和時間を比較するとイオンを照射した試料(B)の方が早い緩和を示しており、その結果遮断周波数は試料(A)が 30 kHz であるのに対し試料(B)では 130 kHz となり 4 倍の高速化を達成した(Fig. 4)。これはイオン照射が電荷捕獲時間のより短い欠陥準位を形成したと考えることでうまく説明がつく。一方で、電荷捕獲時間が短くなったことで一定の励起レートにおいて光誘起吸収効果の原因となる捕獲電荷の数が減少する。そのため効果の大きさは小さくなり、試料(B)では(A)に対して 18%の減少がみられた。イオン照射による結晶のダメージがキャリア寿命と移動度が減少し、空間分解能を改善することも確認できたが、試料(A), (C)の空間分解能はそれぞれ 500 μm 、100 μm 程度であり、素子の二次元利用にはさらに改善が必要である。例えば、空間分解能はプロセスによって InGaN 層を 10 μm 角程度のメッシュ状に切ることで向上させることが可能である。以上の結果から、効果の大きさを損なわないピークイオン濃度が $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ になる程度のイオン照射を行い、プロセスによって空間分解能を上げることが電極フリーの光アドレス型二次元光デバイスを実現するための有効な手段であると考えられる。

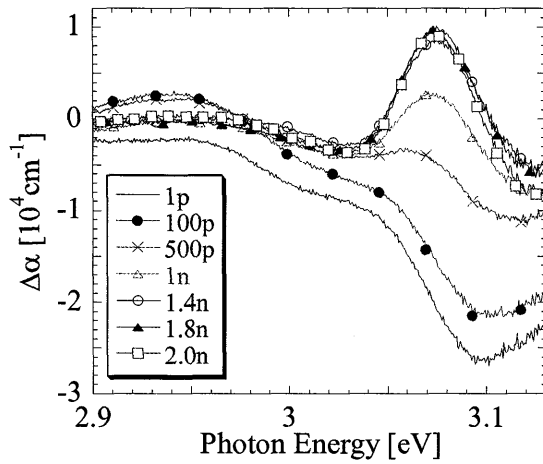


Fig. 1 パルス励起後の吸収係数変化の時間発展。左下の数字はプローブパルスの遅延時間。

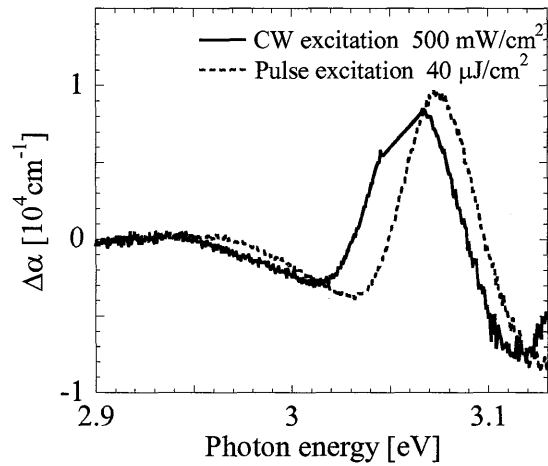


Fig. 2 CW光とパルス励起による吸収係数変化スペクトル。スペクトルは遅延時間2 nsで測定した。

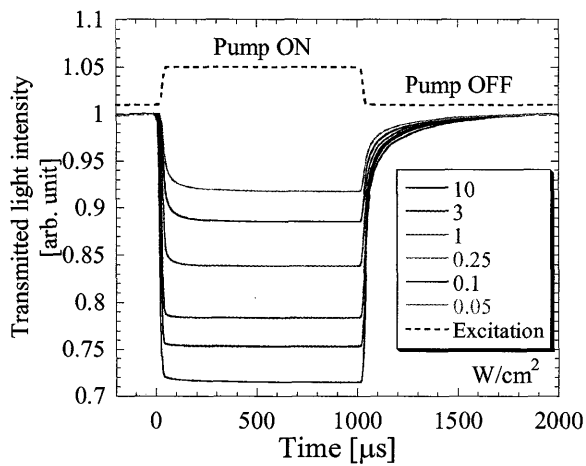


Fig. 3 InGaN/GaN 10周期試料のCW励起時における透過光強度変化。右下の数字は励起強度。

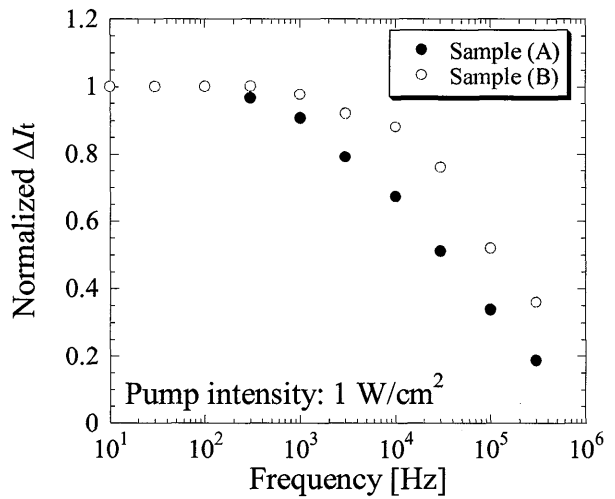


Fig. 4 InGaN/GaN 10周期試料におけるイオン照射が透過光強度変化の周波数依存性に与える影響。