

AlGaN系紫外線受光素子の開発

Development of Ultraviolet AlGaN Photodiodes

湖 東 雅 弘 ^{*1}	谷 口 浩 一 ^{*1}	只 友 一 行 ^{*1}
M. Kotoh	H. Taniguchi	K. Tadatomo
濱 村 寛 ^{*2}	野 村 達 士 ^{*2}	平 松 和 政 ^{*3}
Y. Hamamura	T. Nomura	K. Hiramatsu

要 約

情報技術 (IT) 革命の進展, 我々の扱う情報量の急速な増大に伴って, コンピューターなどに搭載される LSI の高集積化要求が強まっている。高集積化には電子回路のデザインルールの微細化が不可欠であるが, 露光装置であるステッパーに搭載される光源には, ますます短波長化が要求されている。ArF エキシマレーザー (波長 193nm) を露光光源として搭載したステッパーが, 次世代の主流になる。一方, 紫外線計測用には, Si を使った受光素子 (フォトダイオードなど) が使われているが, 特に波長が 200nm 以下の光子エネルギーの大きい遠紫外線では, 放射線損傷による受光感度の低下が問題になる場合がある。今回開発した紫外線受光素子は, Si に比べて格段に化学結合力が強く, 機械的にも熱的にも強靱な性質を有する AlGaN 系化合物半導体を使って作製した。Si 系受光素子が 40% の感度低下を引き起こす厳しい遠紫外線 (波長 193nm) 照射条件下で耐久試験を行った結果, AlGaN 紫外線受光素子は全く感度低下が観測されなかった。即ち, 今回開発した AlGaN 紫外線受光素子は, ArF エキシマレーザーなどの遠紫外線計測用として十分な感度と耐性を兼ね備えていることが確認された。

キーワード: 紫外線, 受光素子, ショットキー接合, フォトダイオード, エキシマレーザー

Summary

With the progress of the information technology (IT) revolution and rapid expansion of information volumes, the demand for more highly integrated LSIs which can be incorporated into computers has increased. The establishment of a smaller design rule of electronic circuits is essential to promote the highly integrated LSIs, while the wavelength of a light source incorporated into a stepper, which is one type of exposure tools on photo-lithography systems, is required to be shortened further. A stepper in which the ArF excimer laser (wavelength: 193 nm) is incorporated as the exposure light source will be the main one in use in the next generation. Meanwhile, for the measurement of ultraviolet (UV) rays, photodetector components (photodiodes) with Si are used. However, light sensitivity often deteriorates due to radiation damage, particularly in the far-UV region which presents a high photon energy with 200 nm or shorter wavelength. Our recently developed UV photodetector was manufactured with an AlGaN-based chemical compound semiconductor which exhibits an exceptionally high chemical bonding strength and is highly resistant to mechanical and heat stresses compared to Si. Results of a harsh endurance test in which far-UV rays (wave length: 193 nm) were irradiated revealed that the sensitivity of the Si-based photodetector was reduced by 40%, while that of the AlGaN UV photodetector remained unchanged. Accordingly, the AlGaN UV photodetector developed by us was confirmed to present sensitivity and endurance sufficient to be used for the measurement of far-UV rays of lasers such as the ArF excimer laser.

Key words: Ultraviolet rays, Photodetector, Schottky barrier, Photodiodes, Excimer laser

1. まえがき

近年の情報技術 (IT) 革命の進展, 我々の扱う情報量の急速な増大に伴って, コンピューターなどに搭載される LSI の高集積化要求が強まっている。高集積化には電子回路のデザインルールの微細化が不可欠であるが, 光リソグラフィ技術に用いる光源には, ますます短波長化が要求さ

れている^①。現在は KrF エキシマレーザー (波長 248nm) が最も微細パターン対応のステッパー露光装置に露光光源として搭載されているが, 次世代のステッパーには ArF エキシマレーザー (波長 193nm) が搭載される。

紫外線計測用には, 一般に Si を使った受光素子 (フォトダイオードなど) が使われているが, 特に波長が 200nm 以下の光子エネルギーの大きい遠紫外線では, 放射線損

* 1 光・電子事業部 フォトニック研究所 * 2 株式会社 ニコン * 3 三重大学

傷による受光感度の低下が問題になる場合がある。即ち、使用条件によっては受光素子の表面状態などが変化し、経時的な信号出力の低下や測定精度の確保が困難になることがある。従って、使用条件が著しく制限されたり、場合によっては頻繁に交換もしくは感度校正を行う必要が生じている。

本報は、Siに比べて格段に化学結合力が強く、機械的にも熱的にも強靱な性質を有するAlGa_N系化合物半導体を使って作製した紫外線受光素子の基本特性を報告する。なお、本開発は、(株)ニコン殿と三重大学殿との共同で行ったものである。

2. AlGa_N系化合物半導体の波長選択性

AlGa_N化合物半導体は、3.39eV(波長365nm相当)のバンドギャップを有するGa_Nと6.2eV(波長200nm相当)のバンドギャップを有するAl_Nの混晶であり、混晶比率を制御することで約200nmから365nmの波長範囲(紫外域)でカットオフ波長選択性を付与することができる⁽²⁾。即ち、半導体の特性として、およそバンドギャップより大きなエネルギーの光にだけ受光感度を有するから、例えば26%のAl_Nを含むAl_{0.26}Ga_{0.74}Nを光検出層に使えば、300nm以上の波長の光に感度を持たない波長選択性を有した受光素子が作製できる。白色光照明下での紫外光検出に、従来のSi受光素子には可視光カットフィルターが必要であるが、AlGa_N受光素子ではこの波長選択性のためにフィルター無しで使用することができる。この性質は、ソーラーブラインド(Solar Blind)と言われ、システム構成の簡略化、耐久性の向上、メンテナンスの容易性に寄与する。

3. 受光素子の概略構造

一般的な半導体受光素子の基本構造としては、①ショットキー接合型 ②pn(pin)接合型、③フォトコン(Photoconductive)型の3種類に分けられ、それぞれTable 1に示すような特徴を有している。

Table 1 The characters of photodiode structures
受光素子構造と特徴

構造	特徴
ショットキー接合型	金属電極と半導体間でショットキー接合したものの。空乏層が最表面に形成され、表面光吸収を利用できる。
pn(pin)接合型	p型層とn型層(あるいは中間層に高抵抗のi層)間で接合したものの。pn型は暗電流が小さい。pin型は接合容量が小さく、高速応答できる。
フォトコン型	高抵抗の半導体層の抵抗の変化を利用。大信号が得られるが、抵抗が大きく、応答速度は遅い。

これらの構造の中で予備検討を行い、ArFエキシマレーザー(波長193nm)を用いて比較検討した結果、ショット

キー接合型の受光素子を用いることで、最も受光感度を得られることがわかった。そこで我々は比較的応答性が良く、また素子表面層での光吸収を有効に活用できるように受光感度が高いショットキー接合型を採用した。開発したAlGa_N受光素子のパッケージング後の写真をFig. 1に示す。この受光素子の素子サイズは7.7mm×7.7mm角、受光面サイズは6.5mmのものである。受光素子はTO8缶にパッケージングされており、受光窓は遠紫外域に対応するため透過性の優れた無水石英を用いている。Fig. 2に、AlGa_N受光素子の断面構造模式図を示す。AlGa_N表面に一定周期で半導体表面が露出する開口部を有するように、ショットキー電極を楕円形状とした。通常、ショットキー電極には透明(透光性の金属薄膜)電極が用いられ、電極を透過した光を電極/半導体界面接合部の空乏層で光を吸収し、光電流を発生させる。しかし、フォトンエネルギーの強い紫外光の照射を受けた場合、この界面接合部が劣化することが危惧され、本開発では透過性のない厚みの楕円形状のショットキー電極を採用した。即ち、本電極構造では界面接合部に直接紫外線が入射しない。この場合、界面接合部より横方向に広がった空乏層領域が光吸収層として作用する。さらに、この構造では表面近くに広がった空乏層に直接紫外線が入射するため、進入深さの浅い遠紫外域の紫外線でも受光感度が落ちることがない利点がある。



Fig. 1 A photograph of the packaged ultraviolet AlGa_N photodiode
AlGa_N受光素子パッケージ写真

4. 受光素子の作製

AlGa_N受光素子構造は、横型常圧有機金属気相成長法(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE)により、Siを $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 添加した約4 μm 厚のn型Ga_N、および無添加の1 μm 厚のGa_Nを、順次サファイア基板上に成膜して作製した。

Fig. 2に示したメサ構造は、反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching: RIE)により形成した。

RIEにより露出されたn-GaN層表面に形成したオーミック電極は、n-GaNと良好なオーミック接触が得られる材料

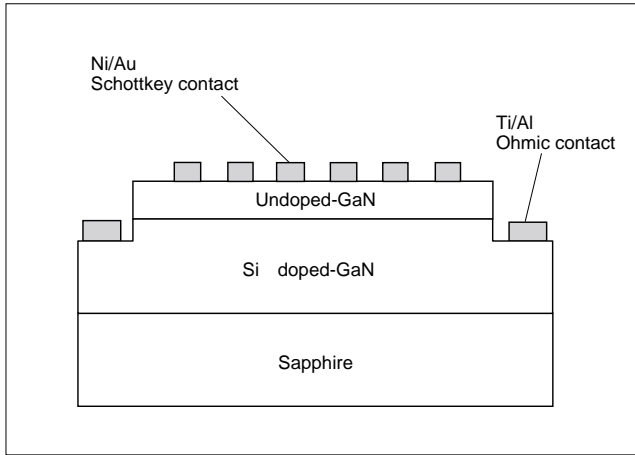


Fig. 2 Schematic of the structure of AlGaIn Schottky barrier photodiode
AlGaIn 受光素子構造模式図

のTiとAlの積層構造(膜厚250nm)を採用した^{(3)~(5)}。また受光面の楕形電極は,AlGaIn化合物半導体と良好なショットキー障壁高さが得られる材料であるNiとAuの積層構造(膜厚150nm)を電子ビーム蒸着法と通常のリソグラフィ技術により形成した^{(6)~(8)}。電流電圧特性からショットキー障壁高さを評価した結果,約1.1eVと良好なショットキー接合が形成されていた。

7.7mm x 7.7mm角の受光素子は,1Vの逆バイアス印加時で暗電流200nA,素子容量1.7nFであった。この暗電流,素子容量は受光素子サイズ(受光面サイズ)に依存しており,サイズを小さくすることで暗電流および素子容量が低減される。

5. 受光感度特性

Fig. 3に受光素子の感度評価を行なった光学系を示す。紫外線光源にはKrFエキシマレーザー(波長248nm,パルス幅~100nsec)を用いた。アッテネーターおよび減光フィルターを用いて素子への照射エネルギーを制御し,スリットにより照射領域を限定した。測定回路は受光素子の高速応答性を評価するため,Fig. 3中に示した市販のバイアスT回路(model 5535,カットオフ周波数10kHz)を用いた。この回路を用いることにより低周波なノイズ成分をカットし,エキシマレーザーの短いパルス幅に対応した高周波成分のみを信号として検出できる。回路中に設けた直列負荷抵抗は50Ωとした。この回路からの出力信号を電圧信号としてデジタルオシロスコープでモニターした。デジタルオシロスコープで得られた信号の時間応答特性をFig. 4に示す。エキシマレーザー照射と同時に信号出力が立ち上がり,レーザーが遮断されると信号出力が立ち下がっていた。得られた波形より受光素子の立ち上がり時間40nsec,立ち下がり時間500nsecの特性が得られた。この波形より信号ピーク電圧を測定し,ピーク電圧と照射エネルギーとの相関性を評価した。

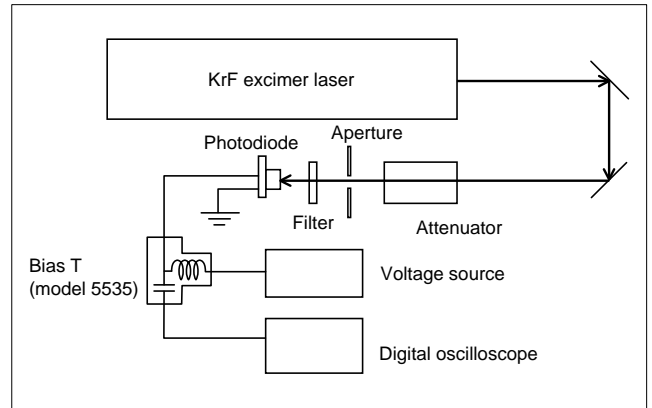


Fig. 3 The system for measuring responses of photodiodes
受光素子の感度評価系

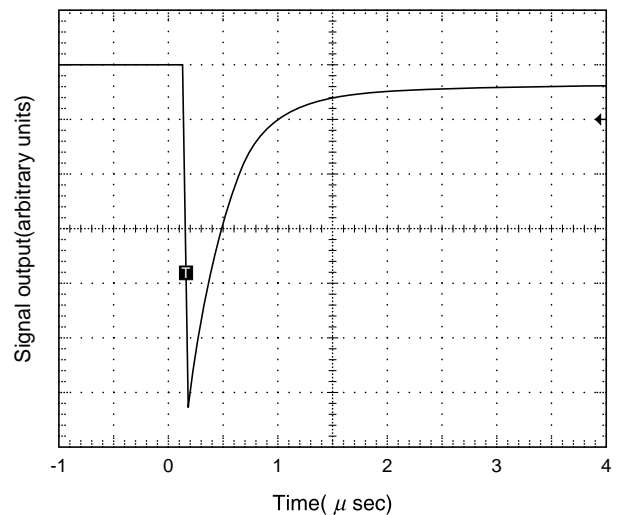


Fig. 4 The temporal response of AlGaIn photodiode
AlGaIn 受光素子の時間応答特性

Fig. 5にKrFエキシマレーザーで評価した照射エネルギーと素子からの出力信号ピーク電圧の関係を示す。これよりダイナミックレンジ40dBの照射エネルギー域で感度のリニアリティを確認した。なお低照射エネルギー域では,測定系の精度誤差のため測定域以下は評価できなかった。また同様の評価をArFエキシマレーザー(波長193nm)を光源に用いた場合も同様の感度特性が得られた。

6. 耐紫外線性の評価

Fig. 6に耐久性を評価した光学系を示す。ArFエキシマレーザーを光源に用い,パーシャルミラーを用いて光路を分岐し,各々AlGaIn受光素子およびSi受光素子に一定強度の紫外線を照射して感度の経時変化を評価した。なお,測定はN₂雰囲気中で行った。評価方法は,一定パルス数照射ごとに感度リニアリティが得られる領域までフィルターにより減光し,各受光素子からの発生ピーク電圧を測定した。リファレンスの光検出器には感度測定時のみレーザーが照射されるようにし,リファレンスの光検出器の信号出

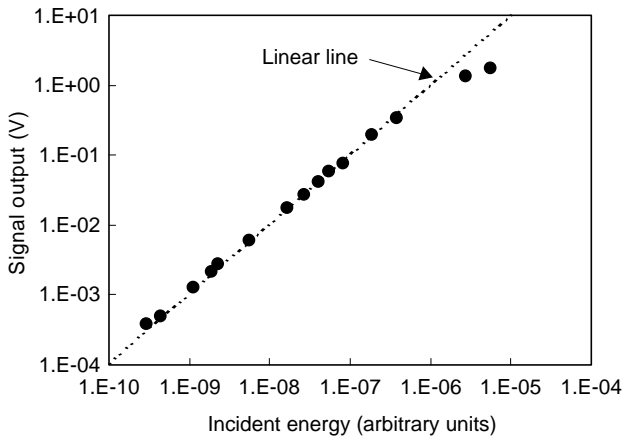


Fig. 5 Signal output of AlGa_N photodiode as a function of normalized incident energy with KrF excimer Laser
KrF エキシマレーザーでの照射強度と信号出力の関係

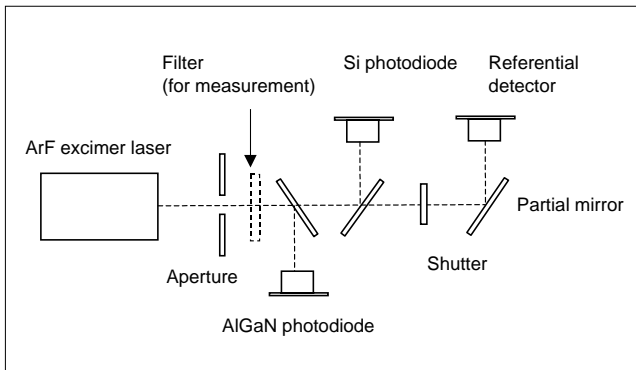


Fig. 6 The system for measuring the changes of normalized responses of photodiodes
受光素子の感度変化評価系

力により各受光素子の信号出力を規格化し、照射初期からの感度変動率を評価した。

Fig. 7に、ArFエキシマレーザーを一定期間照射したときのAlGa_N受光素子およびSi受光素子の感度変化の様子を示す。この結果、Si受光素子の感度が初期の60%まで低下した照射条件下においてもAlGa_N受光素子には感度劣化がみられず、AlGa_N受光素子は遠紫外線に対する十分な耐性を有していることが確認された。このAlGa_N受光素子とSi受光素子間の耐紫外線性の違いは、各々の原子間の結合力の差を反映しているものと考えられる。一般に原子間距離が小さい方が原子間結合力が強い傾向にある⁽⁹⁾。AlGa_NはC(ダイヤモンド)には及ばないものの、Siよりも原子間距離が小さく、原子間結合力も強い。従って、光子エネルギーの強いArFエキシマレーザーがSi受光素子に照射された場合、結晶構造(この場合、特に最表面層と考えられる)に何らかのダメージが入り、結果的に受光感度の低下が起こると推測される。

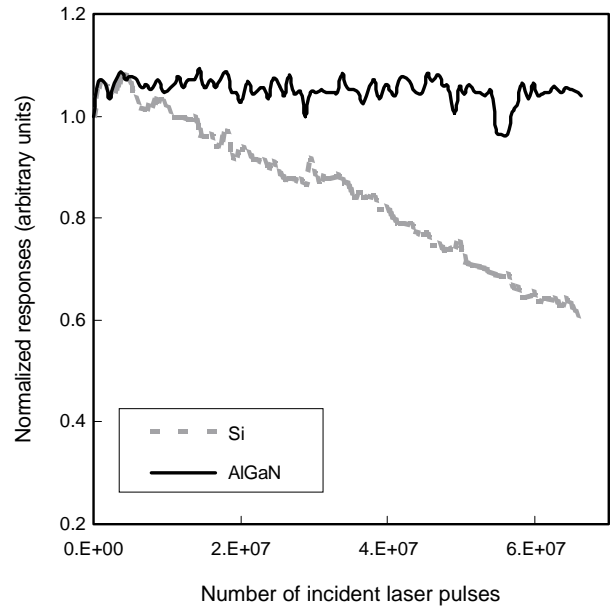


Fig. 7 The changes of normalized responses as a function of the number of incident laser pulses with ArF excimer laser for AlGa_N photodiode and Si photodiode
ArFエキシマレーザーの照射パルス数に対するAlGa_N受光素子およびSi受光素子の受光感度変動率

7. Si受光素子との可換性

実使用時には、受光素子は用途に適した信号処理回路と一体となって用いられる。そこで、ArFエキシマレーザーの光量モニターへの応用を想定し、回路定数を最適化した積分増幅機能を有する信号処理回路を作製し、入射強度に対する信号出力の受光感度評価を行なった。Fig. 8に測定した感度特性を示す。Si受光素子を搭載した信号処理回路の特性も同じくFig. 8に示す。Si受光素子と同様の感度特性がAlGa_N受光素子で得られることが確認され、現在問題点を有しながら使われているSi受光素子との可換性が確認された。

8. むすび

遠紫外線領域で従来のSi受光素子と比較して、耐紫外線性の良好なAlGa_N系受光素子を開発した。また、信号処理回路を作製し、回路からの出力信号を評価した結果、従来のSi受光素子と同等の信号が得られることを確認した。応用は、高輝度遠紫外線に対する耐性を生かしたArFエキシマレーザーなどの計測、エキシマレーザーを使った機器の計測制御などが期待される。また、近年急速に高まってきている分光計測、環境モニター、火災センサとしての紫外線受光素子への波長選択性・高感度性を活かした応用も期待される。今後も用途に応じた素子構造、回路設計など更に改良を加えて行く予定である。

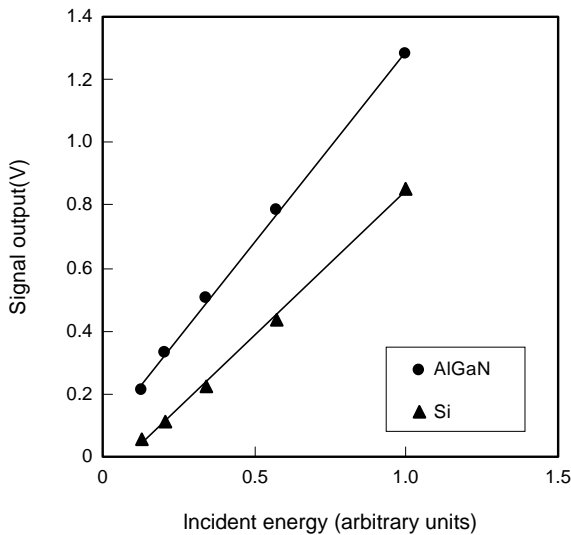


Fig. 8 Signal output of AlGaIn photodiode as a function of normalized incident energy with ArF excimer laser (with integrating and amplifying circuit)
ArF エキシマレーザーでの照射強度と信号出力の関係 (積分増幅回路付き)

謝 辞

本開発を進めるにあたり、受光素子の作製に協力頂いたフォトニック研究所の岡川広明氏、大内洋一郎氏、城市隆秀氏に感謝致します。また、共同開発にあたり、助言・評価など強力なサポートを頂きました(株)ニコン関係部署各位に心より感謝致します。

参考文献

- (1) 笹子勝 . 今後の半導体動向とリソグラフィ技術 . 応用物理 . 68 (5) , 1999 , p.520-526 .
- (2) Matsuoka, T. et al. Wide-gap semiconductor InGaIn and InGaAlN grown by MOVPE. Journal of Electronic Materials, Vol. 21, No. 2, 1992, p.157-163.
- (3) M. E. Lin et al. Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN. Appl. Phys. Lett. 64 (8) , 21 February 1994, p.1003-1005.
- (4) S. Ruvimov et al. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts for n-GaN. Appl. Phys. Lett. 69 (11) , 9 September 1996, p.1556-1558.
- (5) B. P. Luther et al. Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN. Appl. Phys. Lett. 70 (1) , 6 January 1997, p.57-59.
- (6) Q. Z. Liu et al. Ni and Ni silicide Schottkey contacts on n-GaN. J. Appl. Phys. Vol.84, No 2, 15 July 1998, p.881-886.

- (7) E. Monroy et al. GaN-based solar-ultraviolet detection instrument. Appl. Opt. Vol. 37, No. 22, 1 August 1998, p.5058-5062.
- (8) E. Monroy et al. High UV/visible contrast photodiodes based on epitaxial lateral overgrown GaN Layers. ELECTRONICS LETTERS Vol. 35, No. 17, 19th August 1999, p.1488-1489.
- (9) 赤崎勇編著 . 窒化物半導体 . (株)培風館 ,1999 ,p.11-17.



湖東雅弘 (ことう まさひろ)
 光・電子事業部 フォトニック研究所 フォトニックデバイスグループ
 光通信用デバイスの研究・開発に従事
 応用物理学会, 溶接学会会員



谷口浩一 (たにくち ひろかず)
 光・電子事業部 フォトニック研究所 フォトニックデバイスグループ
 光通信用デバイス, 非線形光学デバイスの研究・開発に従事
 応用物理学会, 電子情報通信学会, レーザー学会会員



只友一行 (ただとも かずゆき)
 光・電子事業部 フォトニック研究所 フォトニックデバイスグループ
 フォトニックデバイス, 光半導体デバイスの研究・開発に従事
 応用物理学会, 日本結晶学会, 日本結晶成長学会会員



濱村 寛 (はまむら ゆたか)
 株式会社ニコン 精機カンパニー レンズ技術開発部 材料第一グループ
 光学材料の研究・開発に従事
 応用物理学会会員



野村達士 (のむら たつし)
 株式会社ニコン 精機カンパニー レンズ技術開発部 材料第一グループ
 光学材料の研究・開発に従事



平松和政 (ひらまつ かずまさ)
 三重大学 工学部 電気電子工学科教授, 工学博士
 窒化物半導体の結晶成長およびデバイス応用に関する研究に従事
 応用物理学会, 日本結晶成長学会, Material Research Society, 電子情報通信学会会員