

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360006

研究課題名(和文) 深紫外光透過性発現メカニズム解明による実用的バルク窒化アルミニウム結晶の創出

研究課題名(英文) Preparation of low dislocation density and deep-UV transparent AlN substrates by hydride vapor phase epitaxy

研究代表者

熊谷 義直 (Kumagai, Yoshinao)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20313306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：物理気相輸送(PVT)法で作製した低転位密度(<1000 / cm^2)の窒化アルミニウム(AlN)単結晶基板上へのハイドライド気相成長(HVPE)法によるホモエピタキシャル厚膜成長を検討した。HVPE成長層から作製した自立AlN基板は、PVT-AlN基板と同等の高い結晶品質、また光吸収端206.5 nmの深紫外光透過性を有していた。深紫外光透過性の発現は、炭素不純物濃度が極めて低いことにより得られることが分かった。実際に、HVPE-AlN基板上に有機金属気相成長(MOVPE)法により260 nm帯の深紫外線LED構造を成長し、電流注入発光をAlN基板側より取り出すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：Homo-epitaxial growth of thick AlN layers by hydride vapor phase epitaxy (HVPE) was investigated on low dislocation density (< 1000 / cm^2) AlN wafers prepared by physical vapor transport (PVT). AlN wafers prepared from HVPE layers had high structural quality identical to that of the PVT-AlN wafers and deep-UV transparency with an optical cutoff at 206.5 nm. The development of deep-UV transparency was found to be related to lower concentration of carbon impurity in the HVPE-AlN wafers. Strong electroluminescence (EL) peaking at 268 nm from deep-UV LEDs fabricated by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) on the HVPE-AlN wafers could be extracted through the HVPE-AlN wafers.

研究分野：結晶成長

キーワード：窒化アルミニウム 転位密度 深紫外光透過性 HVPE法 不純物 深紫外線LED MOVPE法

1. 研究開始当初の背景

(1)水銀フリーな深紫外線発光ダイオード(LED)が省エネかつ環境調和の次世代深紫外線光源として注目を集めており、その開発のキーマテリアルである Al 系窒化物結晶の成長が注目されていた。特に、深紫外線 LED 作製の下地となる窒化アルミニウム(AIN)基板の作製が精力的に研究されていた。

(2)AIN バルク結晶の成長法として、AIN 粉末結晶を昇華させる物理気相輸送(PVT)法が先行しており、転位密度が極めて低い AIN 結晶が得られていた。反面、波長 300 nm 以下の深紫外光透過性が失われることが原因不明の解決し難い問題となっていた。一方、我々は、三塩化アルミニウム($AlCl_3$)とアンモニア(NH_3)ガスとの反応により AIN を高速成長可能なハイドライド気相成長(HVPE)法を世界に先駆け実証していた。この手法では極めて高純度かつ深紫外光透過性を有する AIN 結晶を成長可能であったが、種結晶が存在しないためヘテロ成長に起因する高密度の転位発生が問題であった。

2. 研究の目的

(1)PVT 法と HVPE 法の両者の利点の融合が AIN 基板の実用化に必須と考えた。そこで HVPE 法のための格子整合種基板として PVT 法で作製した低転位密度 AIN 基板を用い、ホモエピタキシャル AIN 厚膜の高速 HVPE 成長後に種基板を分離することで低転位密度と深紫外光透過性を併せ持った HVPE-AIN 基板を実現することを第一の目的とした。

(2)AIN 基板の実用化を成し遂げた後、HVPE 成長中に PVT-AIN 基板に高濃度に含まれている酸素(O)、炭素(C)、シリコン(Si)不純物を個別にドーピングした AIN 結晶を作製し、AIN 結晶の深紫外光透過性消失に關与する不純物を特定することを第二の目的とした。さらに、研究協力者と共に HVPE-AIN 基板上に深紫外線 LED を作製し、活性層からの発光を AIN 基板側より取り出せることの実証および LED の特性評価を行うことも目的とした。

3. 研究の方法

(1)PVT-AIN(0001)種基板の Al 極性表面の酸化層を除去後、HVPE 法により 1450 で 200 ミクロンの AIN 厚膜をホモエピタキシャル成長した。成長速度は 25 ミクロン毎時を基準とした。成長後、PVT-AIN 基板を機械研磨で除去して HVPE 層を取り出すと共に、HVPE 層の表裏面を光学グレード研磨して HVPE-AIN 基板を作製し、その各種特性を評価した。

(2)HVPE 法で AIN 厚膜を成長する際に、不純物源を同時供給して不純物ドーピングを実施した。HVPE 層から自立基板を作製し、その結晶性および光学特性を評価し、深紫外光透過性に影響を与える不純物を特定した。

(3)低転位密度かつ深紫外光透過性を有する HVPE-AIN 基板上に有機金属気相成長(MOVPE)法で深紫外線 LED 構造を成長し、基板側からの電流注入発光の取り出しを確認した。また、得られた LED の各種特性を評価した。

4. 研究成果

(1)PVT-AIN 基板上へのホモエピタキシャル AIN 層の HVPE 成長によりクラックフリーかつ無色透明な AIN 厚膜が得られた。次いで PVT-AIN 基板を除去して HVPE-AIN 基板を作製した。ラマン分光法および X 線回折 Fewster 法による解析から、PVT-AIN 基板、ホモエピタキシャル層、HVPE-AIN 基板共に残留歪が無いことが確認され、PVT-AIN 基板上への理想的なホモエピタキシャル成長を達成できたことが分かった。さらに X 線回折ロッピングカーブ測定および断面 TEM 観察より、HVPE 成長層が PVT-AIN 基板の極めて高い結晶性を引き継いでおり、転位密度が 10^6 cm^{-2} 未満であることが保証された。次に PVT-AIN 基板と HVPE-AIN 基板の光透過率スペクトルを比較した。両基板の表裏面を光学グレード研磨して板厚を 114 ミクロンに揃えて測定した外部光透過率スペクトルを図 1 に示す。両者の構造特性は同等であるにも関わらず、その光透過率スペクトルは大きく異なり、PVT-AIN 基板では波長 290 nm 以下では光透過率がほぼ 0%となるのに対し、HVPE-AIN 基板は高い光透過率を示し、光吸収端も 206.5 nm (6.00 eV) と理想値を示した。

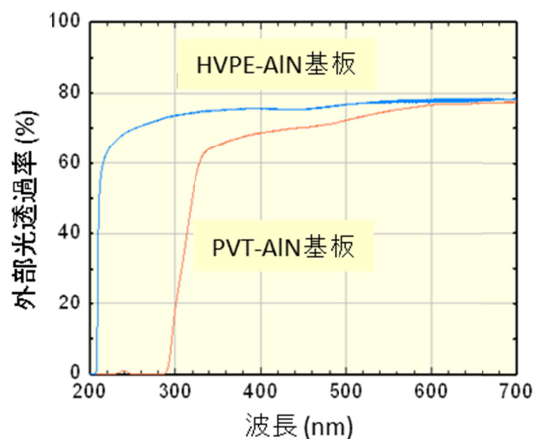


図1 両面研磨 PVT-AIN 及び HVPE-AIN 基板の外部光透過率スペクトル

PVT-AIN 基板と HVPE-AIN 基板の光透過率が大きく異なる理由を検討するため、両基板の二次イオン質量分析 (SIMS) 測定を実施したところ、PVT-AIN 基板では炭素、酸素、シリコン不純物が高濃度 ($[C] = 3 \times 10^{19}$, $[O] = 2 \times 10^{19}$, $[Si] = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) に含まれているのに対し、HVPE-AIN 基板ではこれらの不純物濃度が劇的に低下 ($[C] < 2 \times 10^{17}$, $[O] < 4 \times 10^{17}$, $[Si] = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) していることが確認された。以上より、不純物濃度が減少し

たことが HVPE-AIN 基板の波長 300 nm 以下の光透過率向上に関連しているものと推察された。

(2)低転位密度かつ深紫外光透過性を有する高純度 AIN 基板の作製プロセスを確立できたので、次に、深紫外光透過性に影響を与える不純物の特定を行った。具体的には、HVPE 法による AIN 成長中に Si および C 不純物源を個々に意図的に同時供給し、不純物をドーピングした HVPE-AIN 基板を作製した。まず、不純物濃度の異なる AIN 基板の結晶構造特性を X 線回折ロックアップ測定から評価し、不純物濃度 10^{19} cm^{-3} までのドーピングでは結晶構造特性はアンドープの AIN 結晶と同等であることを確認した。次に、作製した AIN 基板の屈折率 n と消衰係数 k の波長依存性を分光エリブソメトリと光透過率測定を併用した解析により求め、以下の関係から AIN の吸収係数 α の波長依存性を得た。

$$\alpha = 4 k / \lambda$$

その結果、炭素不純物が AIN の深紫外光透過性を急激に劣化させることが明らかとなった。図 2 は炭素濃度の異なる HVPE-AIN 基板および参照用の PVT-AIN 基板の吸収係数の波長依存性である。本図より、炭素濃度の増加と共に 265 nm を中心とする吸収バンドが増大し、炭素濃度 $[C] = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ では吸収係数が 100 cm^{-1} を超えることが分かる。研究協力者と並行して実施した第一原理計算からも、N サイトを置換する C 原子 (C_N) が深いアクセプタ準位を形成し 265 nm の吸収バンドを形成することが解明された。よって、260 nm 帯の深紫外 LED 作製用に AIN 基板を用いる場合、AIN 中の炭素不純物の低減は極めて重要である。なお、アンドープの HVPE-AIN 基板 ($[C] < 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) では、265 nm にお

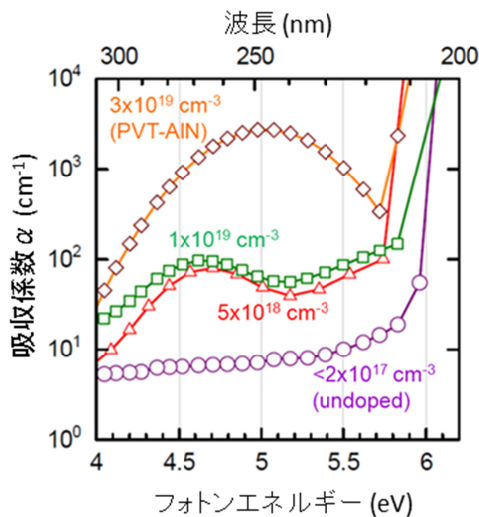


図2 PVT-AIN 及び HVPE-AIN 基板の吸収係数の波長依存性に与える炭素濃度の影響

る吸収係数 α が 6.6 cm^{-1} と極めて小さい値 (世界最小) であることが分かった。

(3)HVPE-AIN 基板の上に実際に深紫外線 LED を作製し、その評価を行った。PVT-AIN 基板の上に 250 μm 厚の AIN ホモエピタキシャル層を HVPE 成長後、表面を CMP 研磨し、その上に引き続き 260 nm 帯の深紫外 LED の作製を行った。深紫外 LED 構造の作製には MOVPE 法を用い、原料ガスにトリメチルアルミニウム (TMA)、トリメチルガリウム (TMG) および NH_3 を使用し、温度 1100 で LED 構造を成長した。図 3 に作製した LED の構造概略を示す。p 層にオーミックコンタクトを形成するため p-GaN が成長される。そのため通常、活性層からの光は基板側からのみ取り出すことができる。フォトリソグラフィ、ドライエッチング、電極形成後、 $600 \times 400 \mu\text{m}^2$ サイズの LED を作製した。ここで一度、電流注入発光スペクトルを測定し、次に PVT-AIN 基板を機械研磨により除去して HVPE-AIN 層を露出させ再度電流注入発光スペクトルを測定した。

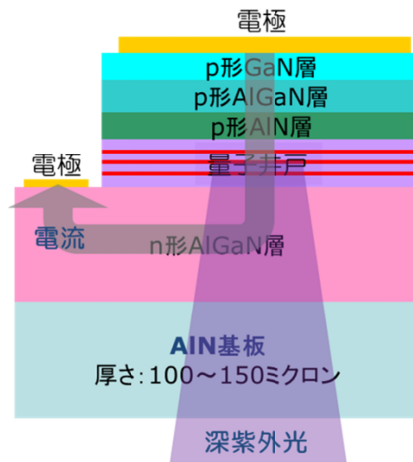


図3 HVPE-AIN 基板上に作製した深紫外線 LED の構造概略図。

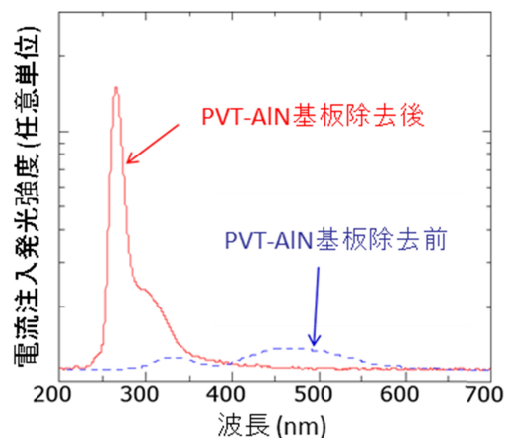


図4 深紫外線 LED の電流注入発光スペクトル

図 4 は PVT-AIN 基板の除去前後の電流注入 (10 mA) 発光スペクトルである。PVT-AIN 基板の除去前は、PVT-AIN 基板による吸収のため波長 290 nm 以下の光がまったく観測されない。一方、PVT-AIN 基板の除去後は HVPE-AIN 基板の高い深紫外光透過性のため、268 nm に中心を持つ活性層からの発光ピークが観測されるようになった。パッケージした LED の評価により注入電流量の増加に伴った出力増加も確認し、250 mA 注入時に出力は 28 mW に達することが確認され、低転位密度かつ深紫外光透過性を有する HVPE-AIN 基板の優位性が示された。

(4)以上の一連の研究により、AIN バルク結晶の深紫外光透過性を消失させていた原因を解明でき、さらに深紫外線 LED 作製に供することのできる実用レベルの低転位密度かつ深紫外光透過性を有する HVPE-AIN 基板を実用化することもできた。本成果は学術面および産業面から世界中で大変注目され、論文 9 報、国際会議発表 26 件 (うち 11 件招待講演)、国内会議発表 15 件 (うち 4 件招待講演) となった。また、学会賞を 3 回受けると共に、2 回のプレスリリースにより新聞各紙に成果が掲載された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

B. E. Gaddy, Z. Bryan, I. Bryan, J. Xie, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, R. Kirste, Z. Sitar, R. Collazo, D. L. Irving, The role of the carbon-silicon complex in eliminating deep ultraviolet absorption in AlN, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 104, 2014, 202106-1-4

DOI: 10.1063/1.4878657

T. Kuittinen, F. Tuomisto, Y. Kumagai, T. Nagashima, T. Kinoshita, A. Koukitu, R. Collazo, Z. Sitar, Vacancy defects in UV-transparent HVPE-AlN, Phys. Stat. Sol. (c), 査読有, Vol. 11, 2014, 405-407

DOI: 10.1002/pssc.201300529

B. E. Gaddy, Z. Bryan, I. Bryan, R. Kirste, J. Xie, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, Z. Sitar, R. Collazo, D. L. Irving, Vacancy compensation and related donor-acceptor pair recombination in bulk AlN, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 103, 2013, 161901-1-5

DOI: 10.1063/1.4824731

T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H. Yanagi, B. Moody, S. Mita, S. Inoue, Y.

Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, Performance and Reliability of Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on AlN Substrates Prepared by Hydride Vapor Phase Epitaxy, Appl. Phys. Express, 査読有, Vol. 6, 2013, 092103-1-3

DOI: 10.7567/APEX.6.092103

K. Nomura, S. Hanagata, A. Kunisaki, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, High-Temperature Heat-Treatment of *c*-, *a*-, *r*-, and *m*-Plane Sapphire Substrates in Mixed Gases of H₂ and N₂, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 52, 2013, 08JB10-1-4

DOI: 10.7567/JJAP.52.08JB10

T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, Y. Kumagai, J. Xie, R. Collazo, H. Murakami, H. Okamoto, A. Koukitu, Z. Sitar, Structural and Optical Properties of Carbon-Doped AlN Substrates Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using AlN Substrates Prepared by Physical Vapor Transport, Appl. Phys. Express, 査読有, Vol. 5, 2012, 125501-1-3

DOI: 10.1143/APEX.5.125501

T. Kinoshita, K. Hironaka, T. Obata, T. Nagashima, R. Dalmau, R. Schlessler, B. Moody, J. Xie, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on AlN Substrates Prepared by Hydride Vapor Phase Epitaxy, Appl. Phys. Express, 査読有, Vol. 5, 2012, 122101-1-3

DOI: 10.1143/APEX.5.122101

Y. Kumagai, Y. Kubota, T. Nagashima, T. Kinoshita, R. Dalmau, R. Schlessler, B. Moody, J. Xie, H. Murakami, A. Koukitu, Z. Sitar, Preparation of a Freestanding AlN Substrate from a Thick AlN Layer Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy on a Bulk AlN Substrate Prepared by Physical Vapor Transport, Appl. Phys. Express, 査読有, Vol. 5, 2012, 055504-1-3

DOI: 10.1143/APEX.5.055504

R. Collazo, J. Xie, B. E. Gaddy, Z. Bryan, R. Kirste, M. Hoffmann, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, D. L. Irving, Z. Sitar, On the origin of the 265 nm absorption band in AlN bulk crystals, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 100, 2012, 191914-1-5

DOI: 10.1063/1.4717623

[学会発表] (計 41 件)

Y. Kumagai, T. Nagashima, T. Kinoshita, R. Togashi, R. Yamamoto, B. Moody, H.

Murakami, R. Collazo, A. Koukitu, Z. Sitar, High-purity and highly-transparent AlN bulk crystal growth for UVC LED application by HVPE, 2015 Photonics West, 2015年2月9日, San Francisco (U.S.A.)

B. E. Gaddy, Z. Bryan, I. Bryan, R. Kirste, J. Xie, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, R. Collazo, Z. Sitar, D. L. Irving, Predicted Properties of Point Defects and Complexes in AlN and AlGaIn, 2014 MRS Fall Meeting and Exhibit, 2014年12月4日, Boston (U.S.A.)

木下亨, 小幡俊之, 永島徹, 柳裕之, Baxter Moody, 三田清二, 井上振一郎, 熊谷義直, 纈纈明伯, Zlatko Sitar, Performance and Reliability of Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on AlN Substrates Prepared by Hydride Vapor Phase Epitaxy, 第75回応用物理学学会秋季学術講演会, 2014年9月18日, 北海道大学札幌キャンパス(北海道・札幌市)

Y. Kumagai, T. Nagashima, T. Kinoshita, B. Moody, R. Togashi, H. Murakami, R. Collazo, A. Koukitu, Z. Sitar, Growth of AlN by Hydride Vapor Phase Epitaxy, International Workshop on Nitride Semiconductors 2014, 2014年8月26日, Wrocław(Poland)

熊谷義直, 永島徹, 木下亨, 村上尚, 纈纈明伯, HVPE法によるAlN単結晶自立基板の作製とそのデバイス応用, 日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第6回窒化物半導体結晶成長講演会, 2014年7月25日, 名城大学天白キャンパス(愛知県・名古屋市)

T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H. Yanagi, B. Moody, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, R. Collazo, Z. Sitar, MOCVD growth of AlGaIn alloy for DUV-LEDs, 17th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, 2014年7月15日, Lausanne (Switzerland)

T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H. Yanagi, B. Moody, R. Collazo, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, Deep UV-LEDs Fabricated on HVPE-AlN Substrates, 5th International Symposium on Growth of III-Nitrides, 2014年5月21日, Atlanta (U.S.A.)

Y. Kumagai, T. Nagashima, T. Kinoshita, B. Moody, R. Togashi, H. Murakami, R. Collazo, A. Koukitu, Z. Sitar, Hydride Vapor Phase Epitaxy and Doping of AlN, 5th International Symposium on Growth of III-Nitrides, 2014年5月19日, Atlanta (U.S.A.)

T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H.

Yanagi, B. Moody, R. Collazo, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, Performance of DUV-LEDs fabricated on HVPE-AlN substrates, 2014 Photonics West, 2014年2月6日, San Francisco (U.S.A.)

額賀俊成, 坂巻龍之介, 平連有紀, 永島徹, 木下亨, Baxter Moody, 村上尚, Ramon Collazo, 熊谷義直, 纈纈明伯, Zlatko Sitar, HVPE法によるPVT-AlN基板上ホモエピタキシャル成長における成長速度増加の検討, 第43回結晶成長国内会議, 2013年11月8日, 長野市生涯学習センター(長野県・長野市)

T. Nagashima, Y. Kubota, R. Okayama, T. Kinoshita, B. Moody, J. Xie, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, R. Collazo, Z. Sitar, Properties of homoepitaxial AlN layers grown by HVPE on PVT-AlN substrates, 8th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors, 2013年10月2日, Seon (Germany)

Y. Kumagai, T. Nukaga, R. Sakamaki, Y. Kubota, T. Nagashima, T. Kinoshita, B. Moody, J. Xie, H. Murakami, A. Koukitu, Z. Sitar, Influence of growth parameters on homo-epitaxial growth of thick AlN layers by HVPE on PVT-AlN substrates, 8th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors, 2013年10月2日, Seon (Germany)

熊谷義直, 久保田有紀, 永島徹, 木下亨, Rafael Dalmau, Raoul Schlessler, Baxter Moody, Jinqiao Xie, 村上尚, 纈纈明伯, Zlatko Sitar, Preparation of a Freestanding AlN Substrate from a Thick AlN Layer Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy on a Bulk AlN Substrate Prepared by Physical Vapor Transport, 第74回応用物理学学会学術講演会, 2013年9月19日, 同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市)

T. Kuittinen, F. Tuomisto, Y. Kumagai, T. Nagashima, T. Kinoshita, A. Koukitu, R. Collazo, Z. Sitar, Vacancy Defects in UV-Transparent HVPE-AlN, 10th International Conference on Nitride Semiconductors, 2013年8月28日, Washington, D.C. (U.S.A.)

B. E. Gaddy, Z. A. Bryan, I. S. Bryan, R. Kirste, J. Xie, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, Z. Sitar, R. Collazo, D. L. Irving, Donor-Acceptor Pair Compensation and the Broad 2.8 eV Luminescence in Bulk AlN, 10th International Conference on Nitride Semiconductors, 2013年8月26日, Washington, D.C. (U.S.A.)

T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H.

- Yanagi, J. Xie, R. Collazo, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, DUV-LEDs Fabricated on HVPE-AlN Substrates, 10th International Conference on Nitride Semiconductors, 2013 年 8 月 26 日, Washington, D.C. (U.S.A.)
- T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H. Yanagi, J. Xie, R. Collazo, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, and Z. Sitar, Fabrication of DUV-LEDs on AlN Substrates, Conference on LED and Its Industrial Application '13, 2013 年 4 月 25 日, Pacifico Yokohama (神奈川県・横浜市)
- T. Kinoshita, K. Hironaka, T. Obata, T. Nagashima, R. F. Dalmau, R. Schlessner, B. Moody, J. Xie, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, Deep ultraviolet light-emitting diodes fabricated on AlN substrates prepared by hydride vapor phase epitaxy, 2013 Photonics West, 2013 年 2 月 6 日, San Francisco (U.S.A.)
- Y. Kumagai, Y. Kubota, T. Nagashima, T. Kinoshita, R. Dalmau, R. Schlessner, B. Moody, J. Xie, H. Murakami, A. Koukitu, Z. Sitar, Hetero- and Homo-Epitaxy of Thick AlN Layers by Hydride Vapor Phase Epitaxy, 2012 Collaborative Conference on Crystal Growth, 2012 年 12 月 12 日, Orlando (U.S.A.)
- 坂巻龍之介, 久保田有紀, 永島徹, 木下亨, Rafael Dalmau, Raoul Schlessner, Baxter Moody, Jinqiao Xie, 村上尚, 熊谷義直, 纈纈明伯, Zlatko Sitar, HVPE 法による深紫外光透過性を有する高品質 AlN ウェーハの作製, 第 42 回結晶成長国内会議, 2012 年 11 月 9 日, 九州大学筑紫キャンパス (福岡県・春日市)
- 21 T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, R. Schlessner, B. Moody, J. Xie, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, Z. Sitar, Optical and structural properties of intentionally C-doped thick HVPE AlN layers grown on PVT AlN substrates, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, 2012 年 10 月 18 日, Sapporo Convention Center (北海道・札幌市)
- 22 R. Collazo, J. Xie, B. E. Gaddy, Z. Bryan, R. Kirste, M. Hoffmann, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, D. L. Irving, Z. Sitar, On the origin of the 265 nm absorption band in AlN bulk crystals, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, 2012 年 10 月 18 日, Sapporo Convention Center (北海道・札幌市)
- 23 Z. Sitar, B. E. Gaddy, R. Collazo, J. Xie, Z. Bryan, R. Kirste, M. Hoffmann, R. Dalmau, B. Moody, Y. Kumagai, T. Nagashima, Y. Kubota, T. Kinoshita, A. Koukitu, D. L. Irving, Prediction of point defect behavior in nitrides using hybrid exchange DFT: Applications to the deep-UV absorption band in AlN, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, 2012 年 10 月 16 日, Sapporo Convention Center (北海道・札幌市)
- 24 永島徹, 久保田有紀, 木下亨, R. Schlessner, B. Moody, J. Xie, 村上尚, 熊谷義直, 纈纈明伯, Z. Sitar, PVT 基板上に成長した C ドープ HVPE 法 AlN 厚膜の光学特性と構造特性, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 2012 年 9 月 13 日, 松山大学文京キャンパス (愛媛県・松山市)
- [その他]
- 第 36 回応用物理学会論文賞(雑誌論文), 2014 年 9 月 17 日
- 第 20 回日本結晶成長学会技術賞, 「HVPE 法による窒化アルミニウム単結晶基板の開発」, 2013 年 11 月 6 日
- 第 35 回応用物理学会論文賞(雑誌論文), 2013 年 9 月 16 日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
熊谷 義直 (KUMAGAI Yoshinao)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 20313306
- (2) 研究分担者
村上 尚 (MURAKAMI Hisashi)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 90401455
- (3) 研究協力者
Zlatko Sitar (SITAR Zlatko)
Department of Materials Science and Engineering・North Carolina State University・Professor
- 永島 徹 (NAGASHIMA Toru)
株式会社トクヤマ・筑波研究所・主任