

窒化物半導体の展開 — 結晶基板とデバイス —

元 木 健 作

Advances in Nitride Semiconductors - Substrates and Devices - — by Kensaku Motoki — Gallium nitride (GaN) and other nitride compound semiconductors show high potential as optical and electronic devices. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has been researching this potential, and in the early 2000s succeeded in developing the world's first 2-inch GaN single crystal substrates with high quality and low dislocation density, which were essential features for violet lasers, by using vapor phase growth technique. Moreover, we have worked on the development of optical and electronic devices using GaN substrates. Taking advantage of the characteristics of GaN's semi-polar {20-21} plane, we succeeded in demonstrating the world's first room-temperature continuous-wave operation of a 520 nm green laser diode. We also successfully fabricated Schottky barrier diodes with a specific on-resistance of 0.71 mΩcm² and breakdown voltage of 1100 V as well as pn-junction diodes with a breakdown voltage of 925 V. Furthermore, we have developed novel vertical heterojunction field-effect transistors which exhibit a low specific on-resistance of 7.6 mΩcm² with a breakdown voltage of 672 V. This paper reviews our R&D activities on GaN-related semiconductors for over the past ten years.

Keywords: GaN, substrate, dislocation, laser, diode, transistor

1. 緒 言

周期律表におけるⅢ-V族を中心とする化合物半導体は、発光ダイオード (LED) や半導体レーザ (LD) 等の光デバイスとして、信号機やディスプレイ用デバイス、さらには照明、およびCDやDVDなどのデジタル情報読み取りの中核デバイスとして応用され、さらに電子デバイスとしては、携帯電話基地局の増幅デバイスとして、また携帯電話中の高周波増幅デバイスとして用いられ、世の中の必要欠くべからざるものとなっている。

当社は、1960年台初頭の頃からGaAs等の化合物半導体のバルク結晶成長に取り組み、デバイスの基礎となる結晶基板、さらにはその上にエピタキシャル成長を行ったエピウエハの開発・製品化を行い、世界の化合物半導体の進展に貢献してきた。そこから発展して1970年台後半からは、InP系、GaAs系の光通信用光デバイスや電子デバイスの研究開発、およびその事業化を進めてきた⁽¹⁾。これらの化合物半導体は、Ga、In、Al等のⅢ族元素と、As、P、Sb等のV族元素の組み合わせからなるⅢ-V族の化合物であり、それぞれが親和性のある似通った性質を示す材料系であった。例えば、それらは全て立方晶系の閃亜鉛鉱型の結晶構造を示し、全て高温で溶融させ凝固過程でバルク単結晶を得ることの出来る溶融成長が可能であった。また、それぞれが比較的広い組成比で化合した混晶を作ることが出来た。バンドギャップは比較的狭く、混晶により発光素子としては赤外光から可視光の黄緑色まで比較的長い波長を

得ることが出来た。

それに対して、1980年台末から大きな進展を見たのが、窒化ガリウム (GaN) を初めとする窒化物系の化合物半導体である。これは、前述の化合物半導体と同じⅢ-V族半導体であり、Ⅲ族元素としてGa、In、Alからなるが、V族元素がそれまでとは違ったN (窒素) で構成されている。しかも結晶構造は、六方晶系のウルツ型であり、前述のGaAs系、InP系の化合物半導体とは化合物を作りやすく、親和性の乏しい異質な材料系である。また、高温では溶融せずに高い分解圧で窒素が分解してしまうため、バルク結晶は、得られていなかった。バンドギャップも大きく、光デバイスとしては、可視光から紫外光をカバーする事が出来る。このように異質な窒化物系化合物半導体は、従来の化合物半導体のようなバルク結晶が得られないため、そのデバイスは、サファイアなどの全く異なる異種材料からなる異種基板上へのヘテロエピによって登場した。1993年にサファイア基板上のダブルヘテロ型エピ構造を有した青色LEDが公表され、日本を中心に世界的に研究開発が加速された。

このようにLEDに関しては、主にサファイア基板を用いたヘテロエピで開発、産業化が進み、現在も照明用途を含めて市場は拡大途上である。しかしながら、窒化物半導体のポテンシャルは、サファイア基板上のヘテロエピだけでは全ての花を開かせることは出来ないとはいえない。バルクの窒

化物半導体基板も必要であった。当社は、GaNのバルク結晶基板の研究開発から開始し、それを実現すると共に、その事業化を進めた。同時に、そのGaN基板を用いて窒化物半導体の応用の幅を広げるべく、各種の窒化物半導体デバイスの研究開発をも進めてきた。

ここでは、当社におけるここ10数年にわたる窒化物半導体に関する取り組みについて、その基板材料と窒化物半導体デバイスとの関係についてレビューする。

2. 窒化ガリウム基板の開発

当社では、他のIII-V族化合物半導体についてそうであったように窒化物半導体に対しても、やはりバルク結晶からその研究開発に着手した。それまでに培って来た窒化ガリウム (GaN) の気相合成法であるHydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)^{*1}を用いて、異種基板上へのヘテロエピタキシャル成長の技術を発展させ、1990年台後半頃からバルク結晶成長に取り組んだ。当時は、GaNのバルク成長は、数万気圧の高温超高压状態での結晶成長法の研究が行われていたが、大口径化が困難で、かつ量産性が低いと考えられていた。当社は、バルク結晶を得るに当たり、HVPEによるエピタキシャル成長により、下地基板上に高速で厚くGaNの結晶成長を行い、その後下地基板を除去する、というプロセスによりGaN結晶基板を得べく開発を進めた。下地基板としてGaNと熱膨張係数が近く、加工しやすく除去が容易なGaAs単結晶基板を選択した。これにより初めて2インチ径のGaN基板の開発に成功した(写真1)⁽²⁾。

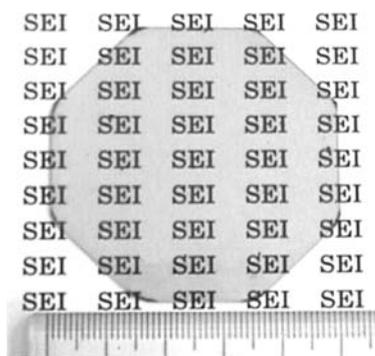


写真1 2インチ径GaN基板

当時のGaN基板の用途は、まずは光ディスクに用いられる青紫色レーザー用であった。既にヘテロエピで製品化されていたLEDとは異なり、レーザーではチップ端面の平坦な反射面を劈開面によって得るために、劈開性を有したホモエピ用基板であるGaN基板が必要とされた。さらに、通常サファイア基板へのヘテロエピのGaN結晶中には、転

位と呼ぶ線状の結晶欠陥が 10^9cm^{-2} も多量に存在しているのであるが、レーザー用のGaN基板には、レーザー素子寿命を伸ばすために転位欠陥の密度をその1万分の1以下に低減する必要があった。

上記の転位密度を大幅に低減するために、当社が開発した2インチ径GaN基板には、当社独自開発によるDEEP (dislocation elimination by the epitaxial-growth with inverse-pyramidal pits) と呼ぶ転位低減手法により、転位密度の低減がなされた。DEEPとは、ヘテロエピの際の基板とエピの間の結晶格子の違いから発生する多量の転位欠陥を低減するために、結晶成長の際の最表面にピット状の窪みを形成し、その形状を維持して厚く成長するというものである。その結果、成長の進行と共に、転位は窪みの中心部分に集合し、その周辺の領域の転位密度を低減する事が出来る。この手法により、数百 μm 径程度の広さの低転位領域を形成する事が出来る。もちろんその後、研磨加工により平坦化されるが、この低転位領域にデバイス構造を形成すればよい^{(3)~(8)}。

DEEP法による基板には、図1の様なバリエーションがある。図1(a)は、転位の集合部とその周囲の低転位密度部とがランダムに分布している。(b)、(c)はDEEP法の応用というべきもので、A-DEEP (Advanced-DEEP) と呼ぶが、転位を集合させる部分にコアと呼ぶ領域を作ったものである。このコア領域は、他の領域に対してGaN結晶のC軸方向([0001]方向)が 180° 反転している。ドット型(b)は、転位の集合部のドット型コアが規則正しく配置され、低転位密度部もそのサイズがほぼ均一となっている。ストライプ型(c)は、転位の集合部であるコアがドット型ではなくストライプ型となっており、 10^4cm^{-2} 程度の転位密度も得られている^{(9)~(11)}。このストライプ型は、レーザー用として開発したもので、この低欠陥密度の実現に

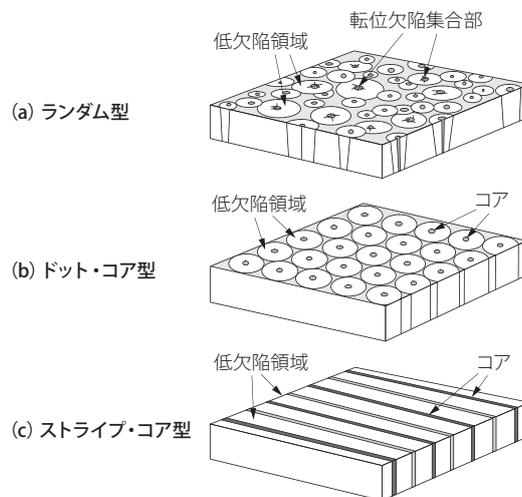


図1 DEEP法によるGaN基板

より初めてレーザ素子寿命が延び、青紫色レーザの実用化を進める事が出来た。既に2002年頃からこの基板を用いたレーザが報告されている^{(12)、(13)}。ブルーレイディスクなどの光ディスク用のレーザ用基板として、またそれ以外への適用も進み、多くの顧客に採用され、当社の半導体基板事業として貢献している⁽¹⁰⁾。

3. GaN 基板上的エピタキシャル成長とLED

3-1 エピタキシャル成長 GaN 基板の実現を受けて、当社ではGaN 基板上へのGaN系エピタキシャル成長、特に光デバイス用エピタキシャル成長とLED応用の研究開発を開始した。既に述べたように、通常、窒化物系のLED等の光デバイスは、下地基板としてサファイア基板が用いられており、前述のように多くの欠陥を有している。これに対し、低欠陥のGaN基板を用いる事により、当然ながら低欠陥のエピタキシャル成長層が得られる。エピタキシャル成長法としてOMVPE (Organo-metallic Vapor Phase Epitaxy) ^{*2}を用いてその最適化を行った。

3-2 GaN 基板上的紫外LED 窒化物系光デバイスでは、発光波長が短くなり紫外領域に達すると、転位密度の影響が現れ、転位密度が高いと発光輝度が低下することが知られていた。紫外LEDは、蛍光体の励起や、殺菌等への応用が考えられ、当社でも低欠陥のGaN基板の特長が生かせる紫外LEDの研究を実施した。GaN基板上に図2に示したLEDを製作した。発光層としてInAlGaN層からなる多重量子井戸(MQW)を有したエビ構造を採用した。同時にサファイア基板を用いたテンプレート上にも同じ構造のエピ成長を同時に行い、両者のLED特性を比較した。

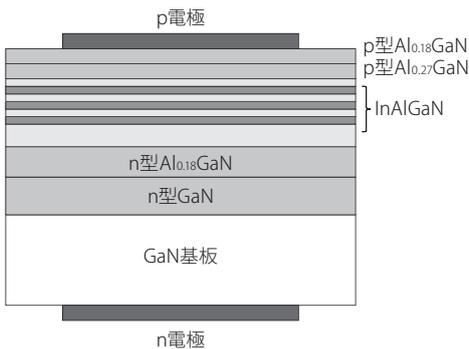


図2 紫外LEDの構造

その結果、両者にはLEDの発光輝度において大きな差が見られ、GaN基板上に作成したLEDからは、サファイア基板上的LEDに対して図3に見られるように、100mA時には約30倍の光出力で波長351nmの紫外光が得られた。

この光出力の差は、評価解析の結果、転位欠陥の為であると考えられる。図4にカソードルミネッセンス (CL) 像に示されたように、サファイア基板上LEDには、多くの発光しない黒点が見られ、これが光出力の低下の原因であった^{(14)、(15)}。サファイア対比で熱伝導率が5倍優れるGaN基板は、発生した熱を効率良く逃がすために光出力が飽和しないというメリットもあった。このように、紫外LEDにおいては、GaN基板を使用することで、サファイア対比で遙かに優れた発光特性を有するLEDが得られ、GaN基板の優位性が明確化した。

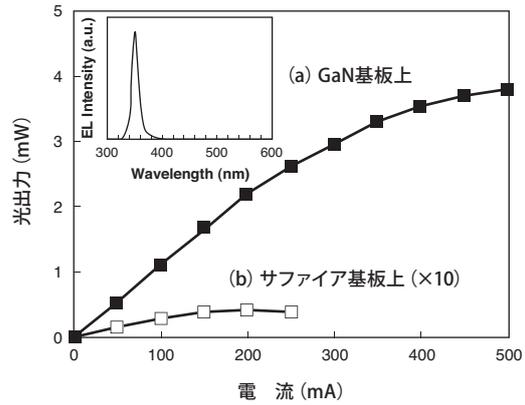


図3 紫外LEDの光出力-電流特性

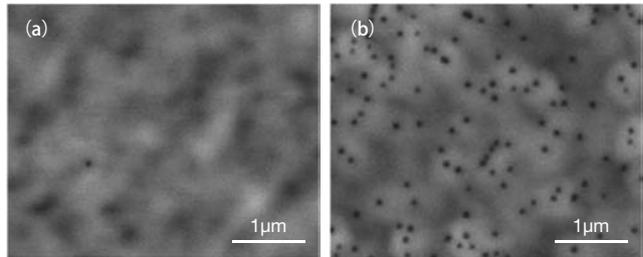


図4 InAlGaInからなるMQW活性層からのCL像 (a) GaN基板上、(b) サファイア基板上

3-3 GaN 基板上的青色LED 一方、可視光の青色LEDは、白色LEDの光源として世の中で広く用いられているが、一般に用いられているのは、サファイア基板である。青色LEDに対しては、通常の使用であれば転位密度はその特性に影響しないものと考えられていた。当社では、この青色LEDにおいて低転位のGaN基板が用いることの優位性はないか、と言う視点からも研究を行った。

サファイア基板上にInGaIn発光層からなるMQW構造を

有したエピ構造を形成して作成された波長450nm前後の青色LEDに対しては、注入電流を上げていった場合、光出力が電流値に比例せずに発光効率が低下して行くdroopと呼ばれる現象が知られており、青色LEDの高出力化における障害となっていた。これに対して、低転位のGaN基板を用いる事によって、MQWにおける量子井戸層の厚さによっては、droopの改善がなされることを見出した^{(16),(17)}。井戸層の厚さを3nmとした場合、注入電流値を20mAから200mAへと上げる際に、droopにより電流値の比例値より30~40%の発光効率(外部量子効率)の低下が見られるが、井戸層厚さを5nmへと厚くした場合、低転位のGaN基板を使用することによって図5に示したように13%程度の効率低下となり、効率低下の減少が見られた。これは、井戸層を厚くする事によって設計上、活性層のIn組成を下げる事が出来、droopの影響を弱められる上に、貫通転位が少ない事による活性層の結晶性の改善が寄与しているためと考えた。青色LEDにおいて、条件付きながらも、低転位GaN基板が優位である可能性が示されたと言える。

またこれ以外にも、GaN基板を用いる事により、基板に導電性があるため電流を均一に広げる効果や、熱伝導率が上がる事により放熱性が良くなるという効果が加わることになる。

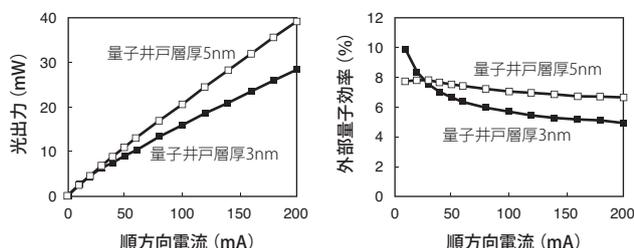


図5 GaN基板上青色LEDの光出力および外部量子効率の順方向電流との関係

かしながら、C面の場合、この内部電界の為に、活性層内で電子とホールが存在場所が分離され、結合する確率が大きく低下する。特に、長い波長の光を得ようとする、活性層中のInGaIn層のIn組成比率を上げる必要があるため、結晶格子が大きくなり、内部応力が増大し、この内部電界も大きくなる。このため発光効率が低下し、長波長の光デバイスの実現が困難であった(図6、図7)。これに対する解決策は既に知られていた。それは、窒化ガリウム結晶においてC面以外の面を用いる事である。C面は極性面と呼ばれ、C面に垂直方向に内部電界が発生し、最も分極の影響が大きい。しかし、C面に垂直な{10-10}面(M面)、{11-20}(A面)などの面に対しては、分極が発生せず、無極性面と呼ばれ、発光効率の低下が防止できる可能性がある。また、C面以外の面で無極性面から傾いた面は、半極性面と呼ばれ、内部電界を低減できる事が予測されていた(図6、図7)⁽²⁰⁾。

ところで、半導体レーザにおいては、窒化ガリウム系のInGaInを発光層とする半導体レーザでは、短波長側で紫色から青色までが実現されているものの、前述の理由で波長が長くなると共に発光効率が低くなるため、緑色やそれより長波長のレーザは未実現であった。一方、波長が長い方は、InGaAsPやAllnGaPを発光層とするレーザにより、赤外から赤色までが実用化されており、ちょうど波長500~600nm程度の緑色付近の半導体レーザが未実現であっ

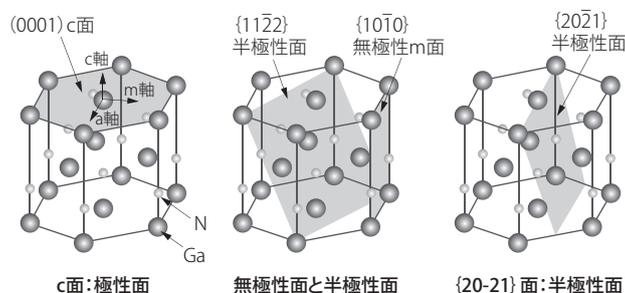


図6 GaNの結晶構造と結晶面

4. 窒化ガリウムの半極性面と緑色レーザの開発

4-1 圧電性と半極性面 これまで述べてきた窒化ガリウム基板上的エピタキシャル成長および、光デバイスは、全て、窒化ガリウム結晶の(0001)面(C面と呼ばれる)を用いる事を前提としていた。一方、窒化ガリウムの結晶は、物性として圧電性(ピエゾ効果)を有する事が知られている。即ち、結晶に応力が掛かるとそれに応じた分極による電界が結晶中に生じる。光デバイスでは、n型半導体層とp型半導体層の間に挟まれた活性層において、前者から供給される電子と後者から供給されるホールとが、結合し、エネルギーを光として放出する事で発光する。し

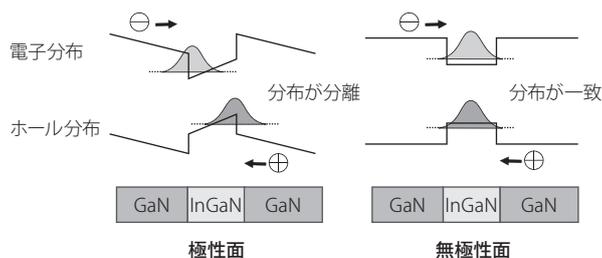


図7 極性面と無極性面の内部電界の影響

た。可視光レーザとして、赤色、青色が既に実用化されているため、あと緑色が実現出来れば、光の3原色が揃うことになり、映像ディスプレイ用途等に応用範囲が大きく広がると思われる。

4-2 緑色レーザの開発 当社では、このような状況に対応し、GaN基板技術を保有する当社の優位性を生かし、無極性面及び非極性面の窒化ガリウム基板を開発して提供することにより、緑色レーザの実現を目指して研究を行ってきた。緑色レーザには、分極の影響を排除するために、無極性面、半極性面の窒化ガリウム基板が必要であり、かつ、活性層のMQWのInGaIn量子井戸層には高いIn組成と同時に優れた結晶性が要求されると、当社は考えた。まずは、それらを全て満足する面方位を有する無極性面、半極性面を見出して、しかる後にレーザを作製する必要があった。

当社での研究開発の結果、見出したのが半極性面である{20-21}面であった。この面を有したGaIn基板上にレーザを作製した。{20-21}面とは、C面をM軸方向へ75°傾けた面であり、基板の貫通転位密度は、 10^6cm^{-2} 以下であった(図6)。その上にn-GaN層、n-InAlGaInクラッド層、n-InGaIn光ガイド層、InGaIn井戸層を有したMQW発光層、p-AlGaIn電子ブロック層、p-InGaIn光ガイド層、p-AlInGaInクラッド層、p-GaNコンタクト層からなるエピ構造を成長した。

得られた{20-21}面レーザは、注入電流量を上げた際の自然放出光の波長のブルーシフト量は、無極性面のm面でのレーザに比べると大きいものの、C面のレーザに比べると遙かに小さく、分極の影響は十分に低減出来ていることが判明した。また、その自然放出光の半値幅は、C面、M面でのレーザに比較して最も小さく、また、{20-21}面のエピ表面の蛍光顕微鏡による観察では、面内が非常に均一で、非発光領域は全く認められなかった。極めて均一な結晶品質となっていることが判明した。この活性層の均一性が{20-21}面レーザの特長であると言える^{(18)~(24)}。

この{20-21}面レーザによって、2009年に世界で初めて緑色レーザ発振を実現した。波長531nmでパルス発振(デューティ比0.5%)し、発振のしきい電流 I_{th} は、924mA (15.4kA/cm^2)、しきい電圧 V_{th} は23.3Vであった。さらには、室温連続発振も実現し、波長520nm、 I_{th} が95mA (7.9kA/cm^2)、 V_{th} が9.4Vであった(図8)。その後、特性改善も進み、2010年には、波長525nm、 I_{th} が51mA (4.3kA/cm^2)、 V_{th} が6.38Vのレーザも公表した⁽²³⁾。この様に当社において、{20-21}面を用いた緑色レーザの開発は進展しているものの、一方、当社以外の他機関でも、C面を用いた緑色レーザの開発も進んできた。図9に現状の他機関の公表データを含めた、緑色レーザの研究開発の状況を示した。この図より明らかなように、C面レーザも発振波長は長くなり、520nmをも上回ってきた。しかしながら、520nm程度まではほとんどしきい電流に差はないも

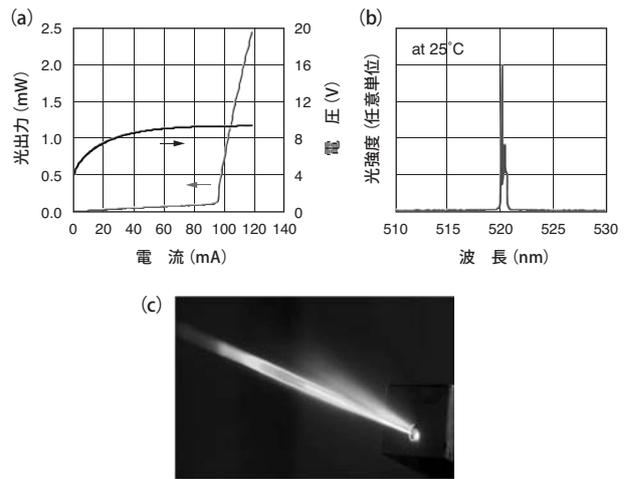


図8 {20-21}面レーザの室温連続発振における光出力特性
(a) 光出力-電流-電圧特性
(b) 波長スペクトル(100mA時のCW発振下)
(c) 520nmレーザ光の発振

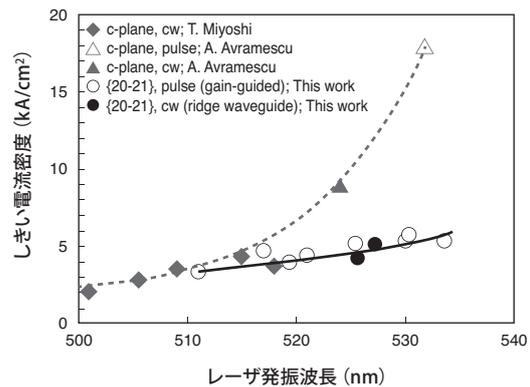


図9 レーザ発振波長とそのしきい電流密度との関係
C面レーザと{20-21}面レーザとの比較を示し、
円形は{20-21}面レーザ、それ以外の三角、
菱形はC面レーザを示す

の、520nmを超えたところから、C面レーザでは、波長発振のしきい電流が高くなり、{20-21}面レーザとの差がはっきりしてきた。{20-21}面レーザでは、発振波長が長くなっても、しきい電流の大きな増加は認められない。これは、半極性面を用いる事で、ピエゾ電界の影響を大きく低減出来た事に加えて、長波長領域においても活性層の均一な結晶性が保たれていることに起因していると考えられる。緑色レーザの実用化を巡り、開発競争は、まだ継続しているが、現時点、原理的にも{20-21}面レーザの方が優位であると考えられる。

5. GaN 基板と電子デバイスの開発

GaN 基板を用いた光デバイスの開発について述べてきたが、電子デバイスへの応用についても並行して研究開発を行った。低転位の GaN 基板を用いて、優位性のある電子デバイスの可能性を追求した。当社では、GaN-HEMT などの通信用高周波デバイスについては、伝送デバイス研究所や住友電工デバイス・イノベーション(株) (SEDI) において研究、事業化が行われているが、それらは、SiC 基板上のヘテロエピタキシャル成長によるものである。ここでは、GaN 基板を用いた電子デバイスの研究開発を取り上げる。

5-1 低転位 GaN 基板上的エピ成長 電子デバイスには、光デバイスとは違って遙かに大きな耐電圧が要求され、そのためには低濃度の領域でのキャリア濃度の制御性が重要になってくる。たとえば、耐圧数 100V から 1kV 以上が要求されるパワーデバイス用途においては、n 型キャリアで $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 程度以下での制御が必要となる。GaN 基板の特長を明確化するために、サファイア基板との比較研究を行った。

転位密度が $4 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下の GaN 基板と、サファイア基板上に GaN のエピタキシャル成長層を有したテンプレート (転位密度 $3 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$) を準備し、その上に n 型不純物の Si を所定量の低濃度ドーピングをそれぞれ行って GaN のエピタキシャル成長を行った。GaN エピ成長は、OMVPE により、原料ガスとして有機金属の TMG (トリメチルガリウム)、 NH_3 を混合して流し、また、 SiH_4 を所定量流して Si ドーピングを行った。その結果、 SiH_4 の供給量と GaN エピ層のキャリア濃度との関係は、**図 10** の通りとなった。GaN 基板上には、ほぼ、想定通りの SiH_4 供給量に比例したキャリア濃度が得られたのに対し、サファイアテンプレート上では、低濃度領域で明らかに想定値とのズレが発生した。分析の結果、両者の間では、Si 以外の不

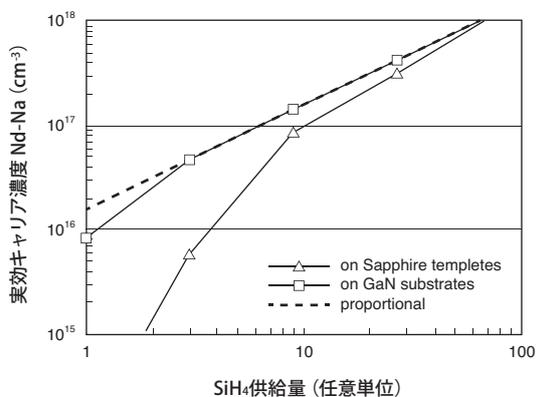


図 10 GaN エピ成長時の SiH_4 供給量とエピ層実効キャリア濃度の関係
(△: サファイア基板上、□: GaN 基板上)

純物の含有量が異なり、特に炭素の不純物濃度がサファイア基板上では一桁多く、この不純物や転位欠陥そのものが、原因となっている事が明らかとなった。GaN 基板上では、平坦な 2 次元成長により GaN のエピ成長が行われるのに対して、転位密度の高いサファイア上では、結晶格子のズレが生じるために 2 次元成長が乱れ、不純物の取り込みが増加するためであると考えられる^{(25)、(26)}。

このように、低転位密度の GaN 基板を用いる事で、低キャリア濃度で制御された高純度エピ層が得られる事が明らかとなり、電子デバイス用途における GaN 基板使用のメリットの一つが明らかとなった。

5-2 ショットキーバリアダイオード GaN 基板を用いた電子デバイスとして、最初に、導電性の GaN 基板を用いた縦型構造であるショットキーバリアダイオード (SBD) の研究を行った。GaN 基板上に、 n^+ -GaN バッファ層を $2 \mu\text{m}$ 成長した後にキャリア濃度 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ の n^- -GaN ドリフト層を $7 \mu\text{m}$ 成長し、ショットキー電極を形成した簡易な構造を作製した。比較のためにサファイアテンプレート上にも同様な成長を行い、比較検討した。サファイア基板は裏面に電極が取れないために、ショットキー電極横にオーミック電極を形成した。結果としては、GaN 基板上の SBD は、耐圧 580V、特性オン抵抗 $1.3 \text{m} \Omega \text{cm}^2$ に対し、サファイア上では、耐圧 163V、特性オン抵抗 $14.4 \text{m} \Omega \text{cm}^2$ となり、耐圧、オン抵抗共に GaN 基板の明らかな優位性が示された。この 1 桁のオン抵抗の相違は、GaN 基板上のドリフト層の高純度化による移動度の増加とデバイス構造の差によるものと考えられる^{(25)、(26)}。

さらに GaN 基板上の SBD の特性向上のために、ショットキー電極の耐圧構造の検討を行い、電極端部の電界集中を緩和するために、電極端部に SiN_x 絶縁膜を挟んだフィールドプレート (FP) を形成した (**図 11**)。この FP を有した SBD は、GaN 基板の転位密度 $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下で、 n^- -GaN ドリフト層厚さは、 $5 \mu\text{m}$ 、Si 濃度は、 $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ であったが、評価の結果、降伏電圧 1100V 以上、特性オン抵抗 $0.71 \text{m} \Omega \text{cm}^2$ を示した。また、パワーデバイスと

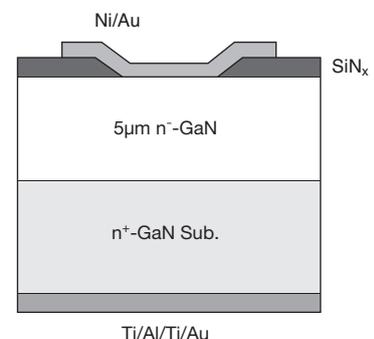


図 11 試作したフィールドプレート構造を有した GaN 基板上 SBD

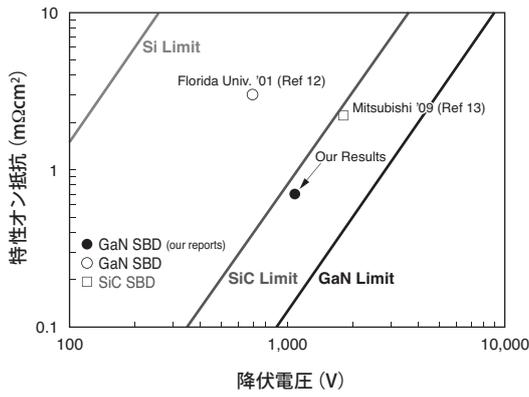


図12 GaN 基板上的のSBDにおける特性オン抵抗と降伏電圧の関係：過去の報告との比較を示す

しての実用サイズの1.1mm角電極サイズでは6Aでの順方向電圧1.46Vを示した^{(27)~(29)}。これらは、図12に示したように他機関を含めた過去のGaNのSBDに関する報告の中でも最も優れたものであり、低欠陥のGaN基板を用いる事の優位性を示すものと言える。

5-3 縦型pn接合型ダイオード また、GaN基板を用いて縦型のpn接合型ダイオードの試作も行った。GaN基板上に0.6μm厚のn⁺-GaNバッファ層と7μmのn⁻-GaN層、0.5μmのp-GaN層、p⁺-GaNコンタクト層を形成し、GaN基板の裏面とp型コンタクト層の表面にn型電極とp型電極をそれぞれ形成し、pn接合型ダイオードを作製した。比較のために、2.6μmのn⁺-GaN層が形成されたサファイア基板の上にも同様な構造を形成し、n型電極は、表側からエッチングによりn型層を露出した上に形成した。

p型層のMgドーピング量を最適化する事により、GaN基板上的のダイオードで、逆方向の耐圧925V、順方向の特性オン抵抗6.3mΩcm²を得た。サファイア上のダイオード

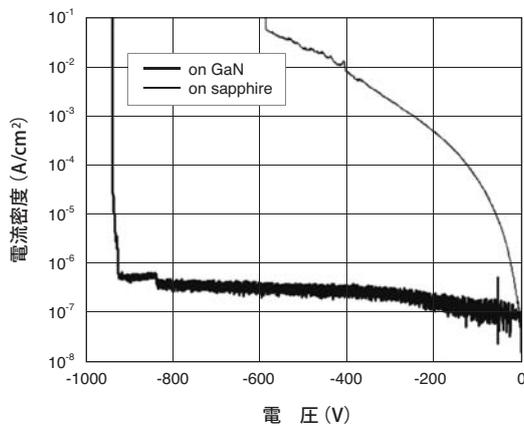


図13 pn接合ダイオードのI-V特性の比較 (GaN基板上およびサファイア基板上的のダイオードの比較)

での耐圧588Vと比較しても大きな耐圧であり、これは、低転位の効果であると考えられる(図13)。この際の絶縁破壊電界強度は、3.27MV/cmとなり、理論値である3.3MV/cmと近い値であった。これは、世界のトップデータであり、GaN基板の優位性を示すものであった^{(26)、(30)}。

5-4 縦型トランジスタの開発 さらに当社では低欠陥の導電性GaN基板を用いて、縦型トランジスタの研究開発も行った。GaN系の窒化物半導体には、SiやSiCの様にイオン注入によるn型やp型領域の形成が出来ないと言う欠点がある。そのため、エピ成長によるn型層、p型層を組み込む必要があり、デバイス設計に工夫が必要である。

図14に示した構造の2次元電子ガス(2DEG)を用いた縦型トランジスタを提案し、試作を行った。GaN基板上にn⁻-GaN層、p⁺-GaN層、n⁺-GaN層のエピ成長層を重ねた後、n⁻-GaN層まで傾斜を付けてエッチングし、その斜面に2DEGを形成するためのn型AlGaIn/GaNヘテロエピ層を成長した構造であり、この斜面のエピ成長面にゲート電極を形成している。チャンネルにヘテロ接合部の2DEGを用いているため高電子移動度による低オン抵抗が期待できる。ソース電極は、リセス構造を作ってp⁺-GaN層とオーミックコンタクトしている。ゲートがオンの際には、n⁺-GaN層からヘテロエピ部の2DEGを通して、縦方向にn⁻-GaN層を経由してドレイン電極に到達する。この縦型トランジスタの評価の結果、トランジスタ動作を確認し、ドレイン電流とドレイン電圧の関係を図15に示した。ゲート電圧1V、ドレイン電圧2Vの時のオン抵抗は7.6mΩcm²であり、この数値はGaN系の縦型トランジスタの特性として世界のトップデータであった。とはいうものの、まだまだ設計上、低オン抵抗化の余地はあると言える。また、耐圧に対しては、ゲート電圧-5Vにおいて、ソース=ドレイン間の耐圧は672Vであった。また、通常GaN系のパワーデバイスにおいては、電流コラプスという特性劣化の問題があるが、本開発のトランジスタにはこの現象は発生しな

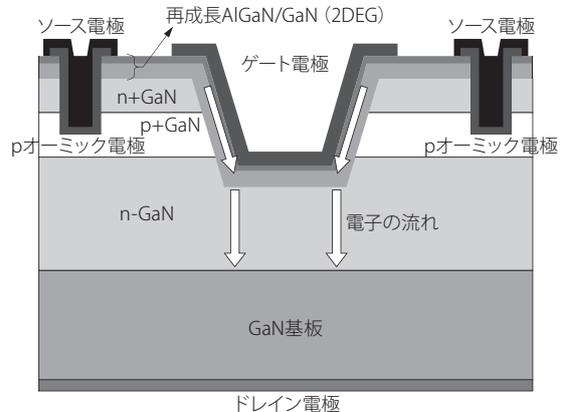


図14 2次元電子ガスを用いた縦型トランジスタ

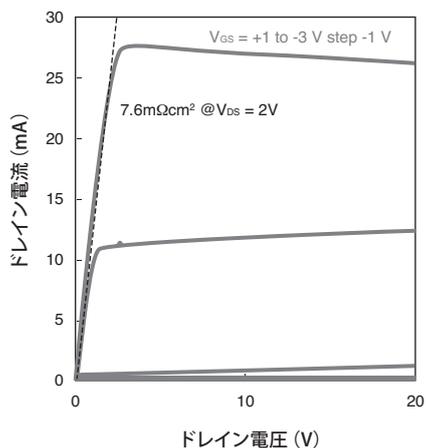


図15 縦型トランジスタのドレイン電流-電圧特性

かった。これは、ゲート電極の直下から裏面のドレイン電極に向けて電流が流れる構造になっており、半導体表面に高電界が生じないためであると考えられる^{(31)~(33)}。

一般にパワーデバイスに対しては、安全性の面からノーマリオフが要求されており、さらに+3V程度のしきい電圧が要求されている。このトランジスタでは、チャンネル形成のためn型AlGa_{0.3}N/GaNヘテロエピ層を用いているため、界面に生じる応力により、ピエゾ電界が発生し、自然に2DEGが形成され、ノーマリオンになってしまう。しかし、AlGa_{0.3}N層の厚さを35nmから10nmへ薄くすることでピエゾ電界を軽減し、しきい電圧を-3.2Vから+0.3Vへ変化させ、ノーマリオフを実現した。+3Vのしきい電圧へ向けての改善は、今後の課題である。また、パワーデバイスについては、低コスト化が重要な問題であり、GaN基板コストの問題は、実用化までに解決が必要な課題である。

6. 今後の展開へむけて

GaN基板の開発とそれを用いた光デバイスおよび電子デバイスに関する当社での研究開発について述べてきた。今後の発展を考えると、さらにデバイス側の要求を先取りした基板開発を進めていく必要がある。基板開発においては、詳細はここでは述べないが、半導体技術研究所および半導体事業部においてさらなる展開に向けての対応を行っている。既に2010年には6インチ径の窒化ガリウム基板の開発に成功し、また同じく2010年に2インチ径の半極性面、無極性面の窒化ガリウム基板の量産技術を確立している(写真2)^{(34),(35)}。さらに、他社との協業により1枚のGaN基板より複数の極薄のGaN薄膜を転写して低コストの薄膜GaN基板の開発を行うことを公表している^{(36),(37)}。品質、コストを含めて今後の窒化物系半導体デバイスの進展を見越して活動を行っている。

また、窒化ガリウム単結晶基板のみならず、窒化アルミニ

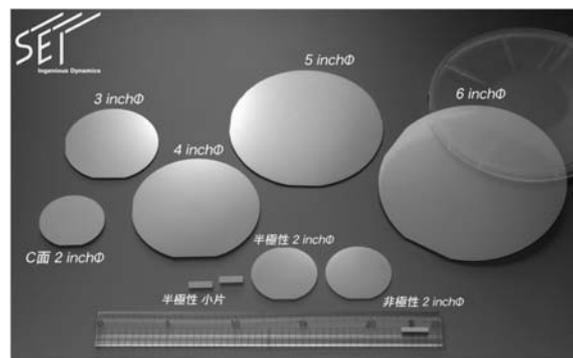


写真2 6インチ径GaN基板と非極性面・半極性面2インチGaN基板



写真3 AlN単結晶成長

ウム単結晶基板の開発にも10年来取り組んでいる^{(38)~(43)}。窒化アルミニウムは、GaNと同じIII-V族の窒化物半導体であるが、バンドギャップが6.2eVとGaNの3.4eVに比べても大きく、GaN系の次の基板材料として期待されるものである。結晶成長方法は、昇華法という2000°C近い高温でAlN原料を蒸発させて低温部に凝縮することで結晶成長する(写真3)。既に半導体用基板としても使用しており、特に当社は、NEDO^{*3}のプロジェクトに参画して、世界で初めてAlN基板上にAlGa_{0.3}NチャンネルのHEMTを作製し、その優れた高温特性の実証に成功した^{(44)~(46)}。今後の窒化物半導体における新材料としての発展を期待したい。

7. 結 言

当社における10数年にわたるGaN系半導体基板及びそれを用いたデバイス等の研究開発の状況をレビューした。この期間は、筆者にとっては非常に短かった様に感じるが、この間に当社の窒化ガリウム系半導体に関する研究開発は相当に幅が広がったと言える。また、レーザ用窒化ガリウム基板、緑色レーザ、電子デバイス、それぞれ完成度は様々ではあるが、研究としては、世界的に見ても相当の成果を取ってきたと思われる。窒化物半導体に取り組み始め

た時点では、当社は、むしろ後発であったと思われる。それでもここまで進めて来る事が出来た理由の一つは、当社が、基板結晶から研究開発に着手し、その後、その基板応用としてエピ、デバイスまで展開してきたと言う点がある。基板とデバイスとの間の相互作用の下に研究開発が進展してきた。これは当社の化合物半導体研究のDNAとも言えよう。このことは、当社の半導体基板事業の顧客にとってもメリットとなっているはずである。しかしながら、研究開発はこれからであり、まだまだ続く。我々は、窒化物半導体に対するさらなる貢献に向かって歩んでいく所存である。

用語集

※1 Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)

Ⅲ族元素の塩化物、Ⅴ族元素の水素化物を原料ガスに用いるエピ成長法の事であるが、GaNの場合、高温でGaとHClを反応させて塩化物のGaClガスを合成し、さらに水素化物のNH₃と反応させてGaN膜を基板上に成長させる気相成長法を言う。大きな成長速度が得られやすい。

※2 OMVPE

Organo-metallic Vapor Phase Epitaxy：有機金属を原料ガスに用いる気相エピ成長法のこと。Ⅲ-Ⅴ族化合物半導体は、通常Ⅲ族元素は有機金属とし、Ⅴ族元素は、水素化物が用いられることが多い。GaNの場合は、トリメチルガリウムとNH₃との反応によりGaN薄膜の気相成長を行う。

※3 NEDO

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

参考文献

- (1) 「住友電工百年史」(1999)
- (2) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushima, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, T. Hirano, M. Nakayama, S. Nakahata, M. Ueno, D. Hara, Y. Kumagai, A. Koukitu and H. Seki, "Preparation of Large Freestanding GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using GaAs as a Starting Substrate", Japanese Journal of Applied Physics 40, L140-143 (2001)
- (3) K. Motoki, T. Okahisa, S. Nakahata, N. Matsumoto, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, M. Ueno, Y. Kumagai, A. Koukitu and H. Seki, "Preparation of Large GaN Substrates", Materials Science and Engineering B, B93, 123-130 (2002)
- (4) K. Motoki, T. Okahisa, S. Nakahata, N. Matsumoto, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, M. Ueno, Y. Kumagai, A. Koukitu and H. Seki, "Growth and Characterization of Freestanding GaN Substrates", Journal of Crystal Growth 237-239, 912-921 (2002)
- (5) 中畑成二、岡久拓司、松本直樹、元木健作、上松康二、上野昌紀、笠井仁、木村浩也、竹本菊郎、「大口径 GaN 単結晶基板の開発」、SEIテクニカルレビュー第161号、76-79 (2002)
- (6) K. Motoki, T. Okahisa, S. Nakahata, K. Uematsu, H. Kasai, N. Matsumoto, Y. Kumagai, A. Koukitu and H. Seki, "Preparation of 2-inch GaN substrates", Proc. 21st century COE Joint Workshop on Bulk Nitride, IPAP Conf. Series 4, 32-37 (2003)
- (7) 元木健作、「Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) によるバルク結晶」、白色LED照明システム技術の応用と将来展望 (シーエムシー出版) (2003)
- (8) 元木健作、「窒化ガリウム基板結晶」、日本電子材料技術協会会報 Vol.37、p2-6 (2006 Oct.)
- (9) Kensaku Motoki, Takuji Okahisa, Ryu Hirota, Seiji Nakahata, Koji Uematsu and Naoki Matsumoto, "Dislocation reduction in GaN crystal by advanced-DEEP", Journal of Crystal Growth 305, 377-383 (2007)
- (10) 元木健作、「窒化ガリウム基板の開発」、SEIテクニカルレビュー第175号、10-18 (2009)
- (11) 日本ファインセラミックス協会編、「発光・照明材料」4.2章、232-241 (2010)
- (12) Motonobu Takeya, Takashi Mizuno, Tomomi Sasaki, Shinro Ikeda, Tsuyoshi Fujimoto, Yoshio Ohfuji, Kenji Oikawa, Yoshifumi Yabuki, Shiro Uchida and Masao Ikeda, Degradation in AlGaInN lasers, physica status solidi (c) Volume 0, Issue 7, pp. 2292-2295 (2003)
- (13) O. Matsumoto, S. Goto, T. Sakai, Y. Yabuki, T. Tojyo, S. Tomiya, K. Naganuma, T. Asatsuma, K. Tamamura, S. Uchida, and M. Ikeda, "Extremely Long Lifetime Blue-violet Laser Diode Grown Homoepitaxially on GaN Substrates", Extended Abstracts of the 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya, pp. 832-833 (2002)
- (14) Katsushi Akita, Takao Nakamura and Hideki Hirayama, "Advantages of GaN Substrates in InAlGaN Quaternary Ultraviolet-Light-Emitting Diodes", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 12, pp. 8030-8031 (2004)
- (15) 秋田勝史、京野孝史、上野昌紀、中村孝夫、平山秀樹、「紫外LEDにおけるGaN基板の効果」、SEIテクニカルレビュー第165号、1-6 (2004)
- (16) Katsushi Akita, Takashi Kyono, Yusuke Yoshizumi, Hiroyuki Kitabayashi and Koji Katayama, "Improvements of external quantum efficiency of InGaN-based blue light-emitting diodes at high current density using GaN substrates", Journal of Applied Physics 101, 033104 (2007)
- (17) 秋田勝史、京野孝史、善積祐介、北林弘之、片山浩二、「低転位 GaN 基板を用いた青色LEDの高効率化」、SEIテクニカルレビュー第171号、40-45 (2007)
- (18) Yohei Enya, Yusuke Yoshizumi, Takashi Kyono, Katsushi Akita, Masaki Ueno, Masahiro Adachi, Takamichi Sumitomo, Shinji Tokuyama, Takatoshi Ikegami, Koji Katayama and Takao Nakamura, "531nm Green Lasing of InGaN Based Laser Diodes on Semi-Polar (20-21) Free-Standing GaN Substrates", Applied Physics Express 2, 082101 (2009)
- (19) Yusuke Yoshizumi, Masahiro Adachi, Yohei Enya, Takashi Kyono, Shinji Tokuyama, Takamichi Sumitomo, Katsushi Akita, Takatoshi Ikegami, Masaki Ueno, Koji Katayama and Takao Nakamura, "Continuous-Wave Operation of 520nm Green InGaN-Based Laser Diodes on Semi-Polar (20-21) GaN Substrates", Applied Physics Express 2, 092101 (2009)
- (20) 京野孝史、塩谷陽平、秋田勝史、上野昌紀、足立真寛、住友隆道、徳山慎司、池上隆俊、片山浩二、中村孝夫、「世界初の新規 GaN 基板上純緑色レーザ開発 I」、SEIテクニカルレビュー第176号、88-92 (2010)
- (21) 足立真寛、京野孝史、塩谷陽平、秋田勝史、上野昌紀、住友隆道、徳山慎司、池上隆俊、片山浩二、中村孝夫、「世界初の新規 GaN 基板上純緑色レーザ開発 II」、SEIテクニカルレビュー第176号、93-96 (2010)

- (22) Takashi Kyono, Yusuke Yoshizumi, Yohei Enya, Masahiro Adachi, Shinji Tokuyama, Masaki Ueno, Koji Katayama and Takao Nakamura, "Optical Polarization Characteristics of InGaN Quantum Wells for Green Laser Diodes on Semi-Polar {20-21} GaN Substrates", Applied Physics Express 3, 011003 (2010)
- (23) Masahiro Adachi, Yusuke Yoshizumi, Yohei Enya, Takashi Kyono, Takamichi Sumitomo, Shinji Tokuyama, Shinpei Takagi, Kazuhide Sumiyoshi, Nobuhiro Saga, Takatoshi Ikegami, Masaki Ueno, Koji Katayama and Takao Nakamura, "Low Threshold Current Density InGaN Based 520-530nm Green Laser Diodes on Semi-Polar {20-21} Free-Standing GaN Substrates", Applied Physics Express 3, 121001 (2010)
- (24) Masaki Ueno, Yusuke Yoshizumi, Yohei Enya, Takashi Kyono, Masahiro Adachi, Shinpei Takagi, Shinji Tokuyama, Takamichi Sumitomo, Kazuhide Sumiyoshi, Nobuhiro Saga, Takatoshi Ikegami, Koji Katayama and Takao Nakamura, "InGaN-based true green laser diodes on novel semi-polar {20-21} GaN substrates", Journal of Crystal Growth, 315, 258-262 (2011)
- (25) S. Hashimoto, Y. Yoshizumi, T. Tanabe and M. Kiyama, "High-purity GaN epitaxial layers for power devices on low-dislocation-density GaN substrates", Journal of Crystal Growth 298, 871-874 (2007)
- (26) 田辺達也、橋本信、善積祐介、木山誠、「GaN基板上GaNエピタキシャル成長とパワーデバイスへの応用」、SEIテクニカルレビュー第170号、34-39 (2007)
- (27) Taku Horii, Tomihito Miyazaki, Yu Saitoh, Shin Hashimoto, Tatsuya Tanabe and Makoto Kiyama, "High-Breakdown-Voltage GaN Vertical Schottky Barrier Diodes with Field Plate Structure", Materials Science Forum Vols. 615-617, pp963-966 (2009)
- (28) 堀井拓、宮崎富仁、斎藤雄、橋本信、田辺達也、木山誠、「GaN基板上縦型SBDのFP構造による高耐圧化」、SEIテクニカルレビュー第174号、77-80 (2009)
- (29) Yu Saitoh, Kazuhide Sumiyoshi, Masaya Okada, Taku Horii, Tomihito Miyazaki, Hiromu Shiomi, Masaki Ueno, Koji Katayama, Makoto Kiyama and Takao Nakamura, "Extremely Low On-Resistance and High Breakdown Voltage Observed in Vertical GaN Schottky Barrier Diodes with High-Mobility Drift Layers on Low-Dislocation-Density GaN Substrates", Applied Physics Express 3, 081001 (2010)
- (30) Yusuke Yoshizumi, Shin Hashimoto, Tatsuya Tanabe and Makoto Kiyama, "High-breakdown-voltage pn-junction diodes on GaN substrates", Journal of Crystal Growth 298, 875-878 (2007)
- (31) Masaya Okada, Yu Saitoh, Mitsunori Yokoyama, Ken Nakata, Seiji Yaegashi, Koji Katayama, Masaki Ueno, Makoto Kiyama, Tsukuru Katsuyama and Takao Nakamura, "Novel Vertical Heterojunction Field-Effect Transistors with Re-grown AlGaIn/GaN Two-Dimensional Electron Gas Channels on GaN Substrates", Applied Physics Express 3, 054201 (2010)
- (32) Seiji Yaegashi, Masaya Okada, Yu Saitoh, Mitsunori Yokoyama, Ken Nakata, Koji Katayama, Masaki Ueno, Makoto Kiyama, Tsukuru Katsuyama and Takao Nakamura, "Vertical heterojunction field-effect transistors utilizing re-grown AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas channels on GaN substrates", Phys. Status Solidi C 8, No. 2, 450-452 (2011)
- (33) 岡田政也、斎藤雄、横山満徳、中田健、八重樫誠司、片山浩二、上野昌紀、木山誠、勝山造、中村孝夫、「低転位 GaN 基板上縦型トランジスタの開発」、SEIテクニカルレビュー第178号、84-88 (2011)
- (34) 住友電気工業(株)プレスリリース (2010年11月16日付)
- (35) 住友電気工業(株)プレスリリース (2010年11月24日付)
- (36) 住友電気工業(株)プレスリリース (2010年12月1日付)
- (37) 住友電気工業(株)プレスリリース (2012年1月24日付)
- (38) M. Tanaka, S. Nakahata, K. Sogabe, H. Nakahata and M. Tobioka, "Morphology and X-ray diffraction peak widths of Aluminium Nitride single crystals prepared by the sublimation method", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, L10621 (1997)
- (39) 宮永倫正、水原奈保、藤原伸介、嶋津充、中幡英章、「昇華法による AlN 単結晶成長」、SEIテクニカルレビュー第168号、103-106 (2006)
- (40) Michimasa Miyanaga, Naho Mizuhara, Shinsuke Fujiwara, Mitsuru Shimazu, Hideaki Nakahata and Tomohiro Kawase, "Evaluation of AlN single-crystal grown by sublimation method", Volume 300, Issue 1, pp. 45-49 (1 March 2007)
- (41) N. Mizuhara, M. Miyanaga, S. Fujiwara, H. Nakahata and T. Kawase, "Growth of high-quality 1-inch diameter AlN single crystal by sublimation method", physica status solidi (c), Volume 4, Issue 7, pp. 2244-2247 (2007)
- (42) Issei Satoh, Satoshi Arakawa, Keisuke Tanizaki, Michimasa Miyanaga and Yoshiyuki Yamamoto, "Sublimation growth of nonpolar AlN single crystals and defect characterization", physica status solidi (c), Volume 7, Issue 7-8, pp. 1767-1769 (2010)
- (43) 佐藤一成、荒川聡、谷崎圭祐、宮永倫正、櫻田隆、山本喜之、中幡英章、「窒化アルミニウム単結晶基板の開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、87-91 (2010)
- (44) 橋本信、秋田勝史、田辺達也、中幡英章、竹田健一郎、天野浩、「AlN 基板を用いた AlGaIn チャネル HEMT エピの開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、92-96 (2010)
- (45) S. Hashimoto, K. Akita, T. Tanabe, H. Nakahata, K. Takeda and H. Amano, "Study of two-dimensional electron gas in AlGaIn channel HEMTs with high crystalline quality", Phys. Stat. Sol. (c) 7, 1938 (2010)
- (46) 秋田勝史、橋本信、山本喜之、矢船憲成、徳田博邦、葛原正明、岩谷素顕、天野浩、「AlN 基板を用いた高 Al 組成 AlGaIn HEMT の開発」、SEIテクニカルレビュー第180号、83-88 (2012)

執筆者

元木 健作 : シニアスペシャリスト
 半導体技術研究所 コア技術研究部
 部長 博士 (工学)
 窒化物半導体を含む化合物半導体関連の
 研究開発に従事

