

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02775

研究課題名(和文)空間分布を制御した希土類添加III族窒化物半導体の形成とその磁気特性

研究課題名(英文)Controlling spatial distribution of rare-earth elements in III-nitride semiconductors and their magnetic properties

研究代表者

長谷川 繁彦 (Shigehiko, HASEGAWA)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：50189528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：希土類添加III族窒化物磁性半導体を再現性良く形成する上での課題として、磁性元素である希土類イオンの空間分布の制御と解析を掲げた。GaNを母相として、希土類元素をランダムに添加した試料、2次的ならびに3次的規則にしたがって添加した試料をプラズマ支援分子線エピタキシー法で形成し、磁性元素の空間分布制御が可能であることを示した。その構造と磁気特性解析から、磁性元素の空間分布と磁気特性との間に相関があり、磁気特性向上にはその空間分布制御が重要であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性半導体は、次世代高度情報化社会の基盤を支える光電子デバイス材料の有力な候補と目されている。その材料創製実現に向けて、磁性元素添加方式による改善、すなわち磁性元素の空間分布制御による磁気特性向上が可能であることを示す研究成果が得られている。磁気特性と磁性元素の空間分布の相関に関する知見は、窒化物磁性半導体での磁性発現機構解明に貢献する成果である。また、本研究で提案した添加方法によりナノ領域での結晶構造制御が可能となることを示しており、新たな材料創製への道を拓く成果と言える。

研究成果の概要(英文)：We have focused on controlling and analyzing the spatial distribution of rare-earth (RE) elements in III-nitride semiconductors toward growth of nitride-based magnetic semiconductors in a reproducible fashion. The three types of samples with the different spatial distributions of RE elements (random, 2-dimensional (2D), and 3-dimensional (3D) types) were grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy: conventional RE-doped GaN films, superlattices (SLs) consisting of sub-nm-thick RE nitride (REN) layers and ~5-nm-thick GaN layers, and SLs consisting of sub-nm-thick REN and ~2-nm-thick GaN layers, respectively. Structural analyses showed that the growth of GaN/REN SLs is a suitable method for controlling the spatial distribution of RE elements in GaN. Magnetic and magneto-optic properties for the three types provide an experimental evidence that controlling spatial distribution of RE ions in GaN is crucial for improving its magnetic properties.

研究分野：分子線エピタキシー法による半導体材料創製とその物性評価

キーワード：エピタキシャル成長 窒化物半導体 空間分布制御 結晶構造 磁気特性 陽電子消滅法 原子空孔 第一原理計算

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

遷移金属元素を添加した GaN では室温でも強磁性が発現するとの理論的予測がなされ[1, 2]、実験的にも室温強磁性発現の報告がなされてきた。添加する磁性元素として希土類元素も検討され、プラズマ支援分子線エピタキシー(PA-MBE)法[3]やイオン注入法[4]で形成した Gd 添加 GaN は室温以上でも強磁性を発現することが報告された。その後、国内外の多くの研究機関から、室温以上でも強磁性を示すことが報告されてきており、半導体スピントロニクスデバイス材料の一つとして有望視されている。添加した希土類元素 Gd は III 族サイトを占め、N イオンが作る四面体の中心に位置しており、ウルツ鉱型(wz-)もしくは閃亜鉛鉱型(zb-)として取り込まれていると考えられる。強磁性発現には少なくとも 5~10%程度の希土類添加が必要である。研究代表者らは、希土類添加窒化物希薄磁性半導体 (GaGdN, GaDyN) 創製において、低温成長や超格子構造形成などを試みてきた。しかしながら、二次相析出などのため、磁性発現に十分な希土類添加濃度を有する薄膜の形成が再現性よく行えない状況にあった。

一方、真性磁性半導体として、希土類窒化物(rare earth nitrides: RENs)が最近注目を集めている。その特徴として、i)母体の構成元素に磁性元素(希土類元素)を含む真性磁性材料である、ii)その多くは半導体である、ことが挙げられる。代表的な REN として岩塩型 GdN (以後、rs-GdN)がある。最近の理論計算によれば、rs-GdN はハーフメタリックなバンド構造を有するとされており、新奇半導体スピントロニクス材料と目され、その光学特性、キャリア制御などの研究が盛んになりつつある。

研究代表者らは、この希土類窒化物の結晶構造を制御して III 族窒化物半導体中に取り込み、希土類添加 III 族窒化物半導体を再現性良く形成することを提案した。その課題として、

(A) 磁性元素である希土類イオンの空間分布制御、

(B) 真性磁性半導体 RENs との融合による III 族窒化物半導体への磁性機能賦与、

を掲げた。(A)についての具体的方法は、格子不整合を利用した結晶構造制御であり、ウルツ鉱型希土類窒化物(wz-RENs)ナノ薄膜の形成(図 1 参照)を実施する。この着想は、 $Ga_{1-x}Gd_xN$  希薄磁性半導体創製の研究成果[5, 6]に基づいている。

磁性発現には、半導体中に添加した磁性元素イオンの空間分布が大きく関わっている。本研究では、磁性元素の空間分布を制御して III 族窒化物半導体に添加し、その磁気特性との相関を明らかにする。磁性元素の空間分布として、wz-REN ナノ薄膜による 2 次元(面内)規則分布型(図 2(b))、wz-REN ナノ薄膜/III 族窒化物積層構造による 3 次元規則分布型(図 2(c))、および従来から作製してきたランダム分布型(図 2(a))を取りあげる。作製には、プラズマ支援分子線エピタキシー(PA-MBE)法ならびにイオン注入法を用

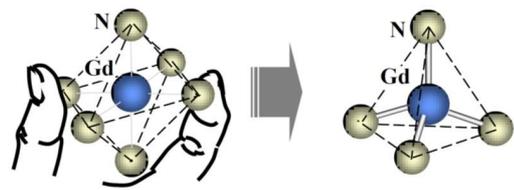


図 1. 提案内容の概念図。応力を加えて結晶構造を制御する。

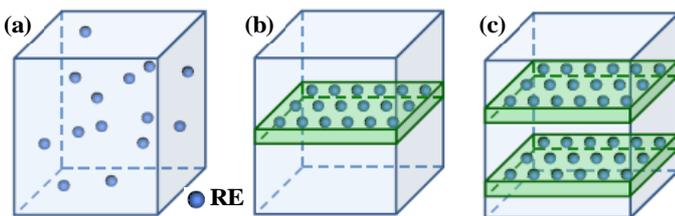


図 2(a)ランダム分布、(b) 2次元規則分布、(c) 3次元規則分布。

### 2. 研究の目的

窒化物ベース磁性半導体創製に向けて、新たな磁性元素添加方法 - 希土類窒化物による規則分布添加 - を提案した。この提案達成に向けて、本研究では、次の 2 点を目的とした。

(A) 格子不整合による応力を利用して、ウルツ鉱型希土類窒化物 (wz-REN) ナノ薄膜を形成し、磁性元素である希土類イオンの空間分布を制御して III 族窒化物半導体中に取り込めることを明らかにする。

(B) wz-REN ナノ薄膜 / III 族窒化物半導体積層構造形成により、磁性イオンが規則的に分布した磁性半導体を形成する。その空間分布と磁気特性の相関を解明し、磁性機能発現機構を提案する。

### 3. 研究の方法

(1) プラズマ支援分子線エピタキシー法により、図 2 に示した希土類元素空間分布を有する試料を、MOCVD で成膜した GaN(0001)テンプレート上に形成した。添加する希土類元素として、Sm, Gd, Tb を取り上げた。研究成果については Tb を中心に述べ、最後に、全体について纏める。ランダム分布型試料とは、従来の添加方式(Tb, Ga, N を同時供給)による  $Ga_{1-x}Tb_xN$  単層膜である。ここで、 $x$  は TbN モル分率である。2次元ならびに 3次元規則分布型試料とは、III 族元素の Tb と Ga の交互供給により形成した TbN 層と GaN 層の積層構造で、その繰返し周期数は 50 とした。以後、この構造を TbN/GaN 超格子と呼ぶ。2次元と 3次元の違いは非磁性層である GaN 層膜厚にあり、磁性層 TbN 間で何らかの交換相互作用が働くと期待できる 3 nm (12 MLs)を基準としている。以後、 $n$  MLs の TbN と  $m$  MLs の GaN による構造を TbN( $n$ )/GaN( $m$ )と略記する。したがって、 $m \leq 12$  が 3次元規則分布型となる。ここで、1 ML(分

子層)は GaN(0001)面の Ga 原子数密度で定義し,膜厚に換算すると 0.26 nm である .TbN 層においては 0.28 nm となるが, 4 MLs ~ 1 nm でおよその膜厚への換算値が得られる . 活性窒素源として高周波プラズマ励起セルを用い,表面平坦性の得られる領域(V/III 比 ~ 1)となるように, III 族元素供給量に合わせて窒素供給量を調節した . 成長時の基板温度は 700 °C とした . 結晶構造評価には, 反射高速電子回折(RHEED), X 線回折, 透過電子顕微鏡(TEM)を, 表面構造評価には, 各種走査型プローブ顕微鏡(STM, AFM, MFM)を, 光学特性評価にはフォトルミネセンス, FT-IR を, 磁気特性評価には SQUID 磁力計を, 磁気光学特性評価には磁気円二色性(MCD)評価装置を, 組成ならびに化学状態分析には X 線光電子分光(XPS)装置を用い, 電気特性は Van der Pauw 法で評価した .

( 2 ) ランダム分布型 GaTbN および 3 次元規則分布型 wz-GdN/GaN, wz-TbN/GaN 中の原子空孔について陽電子消滅ガンマ線のドップラー広がりを計測することで調べた . 消滅ガンマ線のエネルギーは消滅相手の電子の持っていた運動量に応じてドップラーシフトする . 陽電子が原子空孔に捕獲され消滅する場合には, 内殻電子に比べ狭い運動量分布を持つ価電子との消滅割合が増大するため, 消滅ガンマ線スペクトルは先鋭化する . スペクトル形状の変化は, ピーク中心強度を反映する  $S$  パラメータと呼ばれる値を用いて評価した .

( 3 ) イオン注入法によりランダム分布型 GaGdN および比較試料としてランダム分布型 GaCrN を作製し, 注入後アニールによる照射誘起欠陥の回復を陽電子消滅ガンマ線のドップラー広がりを計測することで調べた . 消滅ガンマ線スペクトルのピーク中心強度を表す  $S$  パラメータ (低運動量電子との消滅を反映), ピーク裾部強度を表す  $W$  パラメータ (高運動量電子との消滅を反映) を用いてスペクトル形状を評価した .

( 4 ) GaN(0001)上にエピタキシャル成長したランダム分布型 GaGdN の  $c$  軸方向の格子膨張量と原子空孔との関係について調べるため, Gd 原子近傍に Ga 空孔を導入した構造モデルの  $c$  軸格子定数を第一原理電子状態計算により計算し, 空孔を含まない構造モデルの  $c$  軸格子定数と比較した .

#### 4 . 研究成果

( 1 ) ランダム分布型, 2 次元規則および 3 次元規則分布型試料として, それぞれ  $Ga_{1-x}Tb_xN$  ( $x = 9.0 \%$ ) 単層膜, TbN(1)/GaN(24)および TbN(1)/GaN(10)超格子を取り上げ, その評価結果を述べる .

構造評価: 3 種類の試料について, GaN(0002)回折近傍の XRD( $2\theta$   $\omega$ )プロファイルを図 3 に示す . GaTbN 単層膜では, GaN(0002)回折の低角側に GaTbN からの(0002)ピークが現れている . 薄膜成長時の RHEED 観察から, GaTbN 薄膜は GaN 上にコヒーレント成長していることが分かっているため, その歪も考慮し, ベガード則も成り立っているとして TbN モル分率  $x$  を求めた . Tb の供給量にともなって GaTbN(0002)回折もシフトし, また, この方法で求めた TbN モル分率  $x$  は XPS 測定で得た組成とよく一致していた . この TbN モル分率  $x$  から TbN 成長速度を算出し, 超格子構造成長時の Tb 供給時間を設定した .

また, GaTbN 薄膜の膜厚は, (0002)回折近傍に観測される干渉縞(図 3 内挿図参照)から算出した . TbN(1)/GaN(24)については, 超格子構造を反映したサテライトピークが明瞭に現れており, TbN(1)/GaN(24)超格子構造に対するシミュレーション結果や断面 TEM 観察結果(図 4)もよく一致している . TbN(1)/GaN(10)については,  $2\theta = 30^\circ$  付近に 1 次のサテライトピークが現れている . 断面 TEM 観察から, 層状の積層構造は形成されているものの, その周期にばらつきがあることが分かった . シミュレーションからその平均値として TbN(0.45)/GaN(7)と見積もられた . 以後, この値で記載する .

磁気特性評価: SQUID 磁力計で評価した磁化( $M$   $H$ )曲線と磁化 温度( $M$   $T$ )曲線を, それぞれ図 5, 6 に示す . GaN テンプレートおよびサファイヤ基板の反磁性成分は差し引いてある . 縦軸の磁化は,  $Tb^{3+}$  イオンあたりの磁気モーメントをボーア磁子  $\mu_B$  単位で表記した .  $M$   $H$  および  $M$   $T$  曲線から, GaTbN 単層膜は 5 K においてもほぼ常磁性状態と考えられ, Tb イオンは磁氣的に孤立した状態にあると考えられる . 一方, TbN(1)/GaN(24)と TbN(0.45)/GaN(7)超格子では, 5 K での  $M$   $H$  曲線にヒステリシスループが観測され, また,  $M$   $T$  曲線においても, 60 K 付近で急峻な立ち上がりが見られる . これらのことから, 60 K 以下では強磁性状態にあると考えられる . なお, ZFC と FC 条件下で測定した  $M$   $T$  曲線において, 50 K 以下の温度領域で乖離が見られているのは, 保磁力の温度依存性を反映した結果である .

磁気光学特性評価: SQUID 磁力計では試料に含まれている全磁気モーメントの和の特性として評価しているのに対して, 磁気円二色性(MCD)評価では, 測定波長の光学遷移に関与してい

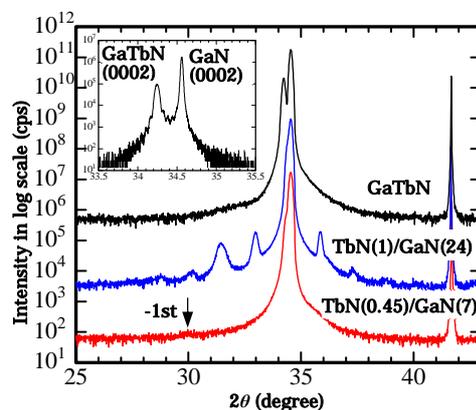


図 3 . ランダム分布型(GaTbN), 2 次元規則分布型(TbN(1)/GaN(24)超格子), 3 次元規則分布型(TbN(0.45)/GaN(7)超格子)の XRD プロファイル . 内挿図: GaTbN 薄膜の GaN(0002)近傍の高分解能 XRD プロファイル .

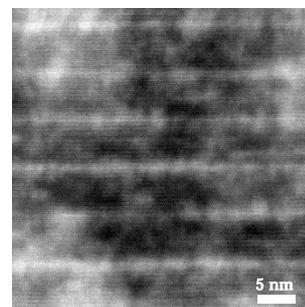


図 4 . GaTbN 薄膜断面の STEM 暗視野像 . 白い領域が TbN 層 .

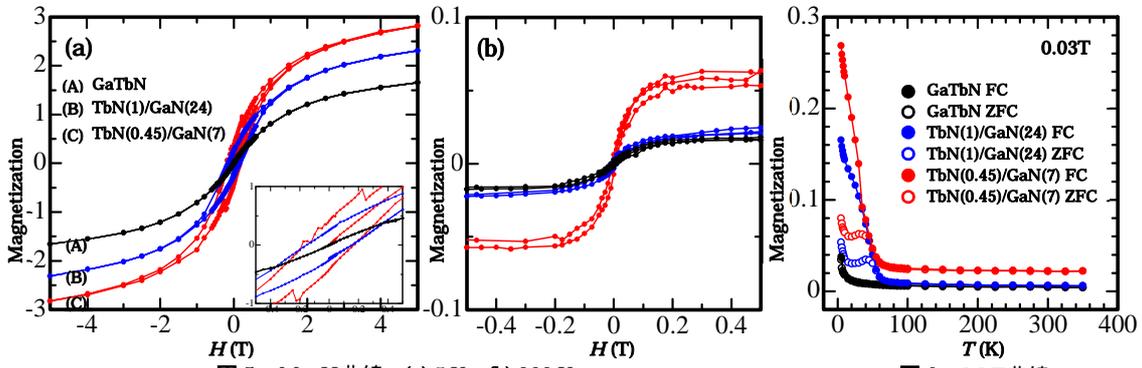


図 5.  $M-H$  曲線. (a) 5 K. (b) 300 K.

図 6.  $M-T$  曲線.

る電子準位の磁気特性評価が可能となる．ここでは、磁性半導体に対する透過法による MCD 評価であるので、基礎吸収端近傍に着目した．図 7 に、3 種類の試料の MCD スペクトルに加えて GaN テンプレートの結果も示した．測定温度は 10 K、印加磁場は +1 T である．GaN テンプレートでは、355.6 nm に負のピークが現れている．これは GaN の A と B エキシトンの Zeeman 分裂に対応している．遷移波長が、それぞれ 356.1, 355.0 nm で、分裂する方向が互いに逆であるとして誘電関数の非対角成分  $\epsilon_{xy}$  を計算することでフィットできる．なお、365 nm 以上の領域では、GaN テンプレートの膜厚 2  $\mu\text{m}$  を反映した干渉による振動が現れている．これに対して、GaTbN 薄膜ではスペクトル形状に大きな変化がみられ、356 nm 付近の正のピークと 360 - 420 nm の領域にわたるブロードな負のピークが現れた．TbN(1)/GaN(24) と TbN(0.45)/GaN(7) 超格子では、この MCD スペクトル全体が 2 nm 程度長波長側にシフトした．このピークの関与している電子準位の起源は現在のところ明確ではないが、Tb 4f 準位が関与していると考えている．GaTbN 薄膜と、TbN(1)/GaN(24) や TbN(0.45)/GaN(7) 超格子との違いは、図 8 に示した MCD ピークの磁場依存性に明確に現れている．GaTbN 薄膜ではヒステリシスは見られず磁場に対してほぼ線形であることから、常磁性状態であると結論できる．一方、2 次元規則分布型である TbN(1)/GaN(24) 超格子では磁場に対して S 字を描いており飽和特性を示し始め、3 次元規則分布型である TbN(0.45)/GaN(7) 超格子では強磁性状態の特徴であるヒステリシスが明瞭に観測されている．

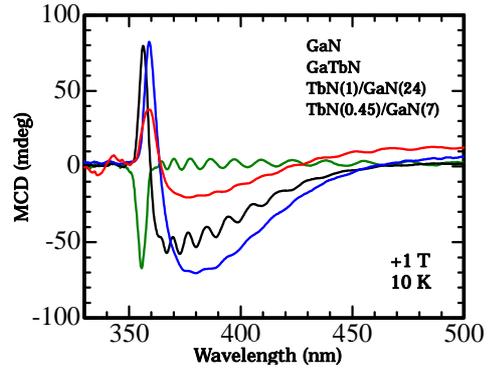


図 7. MCD スペクトル.

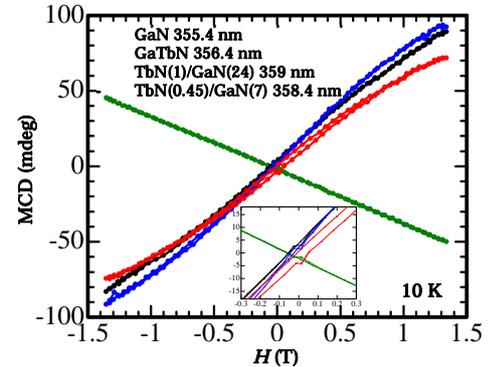


図 8. MCD 磁場依存性.

この 3 種類の試料について、その薄膜全体にわたって平均した TbN モル分率  $x_{ave}$  を求めると、ランダム分布型である GaTbN 薄膜では  $x_{ave}(\text{ランダム}) = 9.0\%$ 、2 次元規則分布型である TbN(1)/GaN(24) 超格子では  $x_{ave}(2D) \approx 1/24 = 4.2\%$ 、3 次元規則分布型である TbN(0.45)/GaN(7) 超格子では  $x_{ave}(3D) \approx 0.45/7 = 6.4\%$  となる．2 次元および 3 次元規則分布型試料では、その平均 TbN モル分率がランダム分布型に比べて半分程度であるにも関わらず磁気的特性が向上している．これらのことから、磁性元素の空間分布と磁気特性には相関があり、3 次元規則分布型が最も効果的な磁性元素添加方式であることが明らかとなった．局所的に TbN モル分率を高めつつ全体が一つの磁性体として機能するような構造、すなわち、強磁性状態発現には、単に磁性ナノ薄膜単体としての集合体ではなく、非磁性層を跨いだ磁性層間の Tb-Tb 原子間にも十分交換相互作用が働くような集合体とすることが重要と言える．

このような結果は、GdN( $n$ )/GaN( $m$ ) 超格子においても、観測された． $n=2$  MLs として  $m=12, 19, 36$  MLs と変えた超格子の、Gd 添加により GaN バンド端近傍に出現した MCD ピークの磁場依存性を図 9 に示す．GaN 層が 36 MLs  $\approx 9$  nm のときは磁場に対して線形であることから常磁性状態と言える．これは、各 GdN 層は磁氣的に孤立したナノ薄膜状態となって

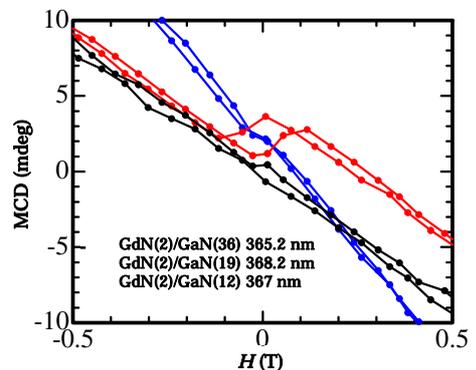


図 9. MCD 磁場依存性.

いるとして理解できる。一方、19 MLs  $\approx$  5 nm のときには、ゼロ磁場付近で傾きが変わっていることから、小さなヒステリシスループがあると考えられる。12 MLs  $\approx$  3 nm においては、ゼロ磁場付近に鮮明なヒステリシスループが現れており、強磁性を示していることは明らかである。なお、Tb と Gd とでヒステリシスループ形状に大きな差がみられている。これは保磁力の差によるもので、全軌道角運動量が 0 ( $L=0$ ) の  $Gd^{3+}$  に比べ、 $L=3$  である  $Tb^{3+}$  は一般に大きな保磁力を有しており、SQUID で得た磁化曲線などにおいてもその差は顕著にみられている。

(2) 図 10 にランダム分布型  $GaTbN$  の  $S$  パラメータの陽電子入射エネルギー  $E$  依存性を示す。  $E=5-10$  keV の領域が  $GaTbN$  層での陽電子消滅に対応する。陽電子が空孔に捕獲されると  $S$  は増大するが、図 10 で  $GaTbN$  層の  $S$  は下地の  $GaN$  層の  $S$  とほぼ同じ値であり、本研究で用意した  $GaTbN$  からは (陽電子が主に検出する)  $Ga$  空孔は観測されなかった。また、3次元規則分布型  $wz-GdN/GaN$ ,  $wz-TbN/GaN$  についても  $S$  パラメータの増大は見られず、 $Ga$  空孔は観測されなかった。

(3) 図 11 に  $Cr^{+}$  注入、 $Gd^{+}$  注入  $GaN$  の  $S$   $W$  相関を示す。 $Cr^{+}$  注入  $GaN$  の  $S$   $W$  は 700 で 10s のアニールにより未照射状態の  $S$   $W$  に近づいているが、その点は未照射状態と照射直後の点を結ぶ直線上に乗っている。これは欠陥構造には変化はなく、その濃度だけが減少していることを示唆している。対照的に  $Gd^{+}$  注入  $GaN$  の  $S$   $W$  は 700 アニールにより前述の直線上から外れ、さらに  $S$  が増大している。これは照射欠陥がクラスタリングした二次欠陥が形成されたことが考えられる。二次欠陥の形成を抑制するには高温イオン注入などの方法を検討する必要性が見出された。

(4) 図 12 に  $GaGdN$  の格子緩和計算結果を示す。 $Gd$  原子近傍に  $Ga$  空孔を導入 (図 12 中、右) すると  $Gd$  原子は  $Ga$  空孔の方向へ大きく変位することがわかる。図 13 は格子緩和計算によって得られた  $c$  軸格子膨張量  $c$  の  $Gd$  濃度依存性である。原子空孔を含まない  $GaGdN$  では当然  $Gd$  濃度の増大に従い  $c$  も増大する。一方で、 $Gd$  原子近傍に  $Ga$  空孔を導入した構造モデルにおいても、原子空孔を含まない構造モデル以上に  $c$  が増大することが示された。このことから  $Gd$  原子近傍への  $Ga$  空孔の導入は  $GaGdN$  の  $c$  軸格子膨張の抑制には寄与しないことが明らかになった。

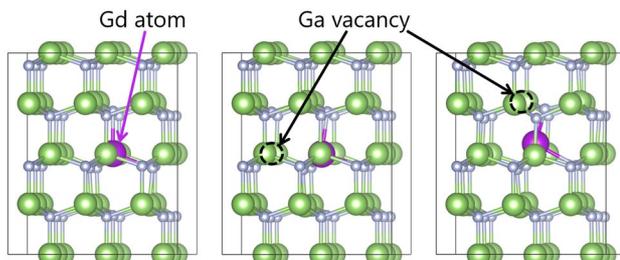


図 12. 格子緩和させた  $GaGdN$  構造の計算結果。  $c$  軸のみ格子定数を固定せずに構造最適化している。(左) 原子空孔を含まない  $GaGdN$ , (中)  $Gd$  原子と同一  $c$  面に  $Ga$  空孔を含む  $GaGdN$ , (右)  $Gd$  原子の一つ上の  $c$  面に  $Ga$  空孔を含む  $GaGdN$ 。

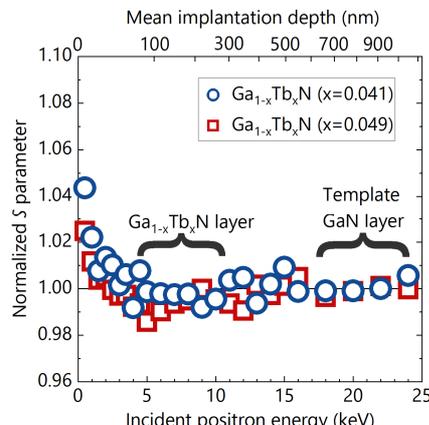


図 10. ランダム分布  $GaTbN$  の  $S$  パラメータの陽電子入射エネルギー依存性。

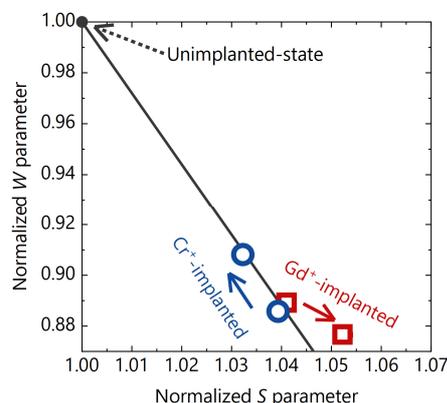


図 11.  $Cr^{+}$  注入、 $Gd^{+}$  注入  $GaN$  の  $S$   $W$  相関。矢印の前後はそれぞれ注入直後および 700 アニール後の点を表す。

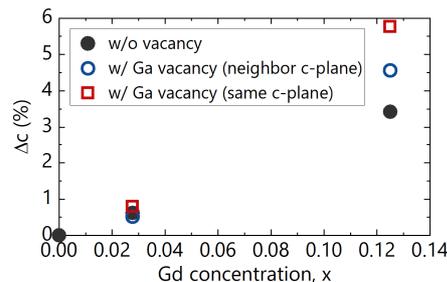


図 13.  $c$  軸格子膨張量  $c$  の  $Gd$  濃度依存性は原子空孔を含まない  $GaGdN$ , およびはそれぞれ  $Gd$  原子の一つ上、 $Gd$  原子と同一  $c$  面に  $Ga$  空孔を含む  $GaGdN$  を表す。

(5) 最後に：本研究により、希土類元素添加  $GaN$  磁性半導体の磁性発現に、磁性元素の空間分布が大きく関わっていること、磁気モーメントの起源は  $Ga$  空孔 [7] ではなく、添加した希土類元素由来であることが明らかとなった。その他、 $GaN$  へ添加した  $Sm$  や  $Tb$  元素の価数状態、キャリア注入効果、希土類窒化物の磁気光学効果などの知見も得られているが割愛した。

#### < 引用文献 >

[1] T. Dietl *et al.* Science **287**, 1019 (2000). [2] K. Sato *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L485 (2001). [3] N. Teraguchi *et al.* Solid State Commun. **122**, 651 (2002). [4] S. Dhar *et al.* Phys. Rev. Lett. **94**, 037205 (2005). [5] K. Higashi *et al.* Appl. Phys. Lett. **101**, 221902 (2012). [6] M. Ishimaru *et al.* Appl. Phys. Lett. **101**, 101912 (2012). [7] Y. Gohda *et al.* Phys. Rev. B **78**, 161201 (2008).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Maekawa M., Sakai S., Hagiwara S., Miyashita A., Wada K., Kawasuso A., Yabuuchi A., Hasegawa S.	4. 巻 2182
2. 論文標題 Magnetic Doppler broadening measurement on Gadolinium-doped GaN	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5135850	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yabuuchi A., Naka R., Sato K., Xu Q., Kinomura A.	4. 巻 461
2. 論文標題 Slow-positron beamline temperature rise reduction at Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 137~141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.09.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yabuuchi A., Yoshiie T., Kinomura A.	4. 巻 463
2. 論文標題 Contribution of cadmium to the total amount of positron creation in a reactor-based slow positron beamline	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 40~49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.11.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yabuuchi A., Tanaka M., Kinomura A.	4. 巻 531
2. 論文標題 Significant growth of vacancy-type defects by post-irradiation annealing in neon ion-irradiated tungsten probed by a slow positron beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152018~152018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka M., Yabuuchi A., Kinomura A.	4. 巻 2182
2. 論文標題 Irradiation-induced vacancy defects and its recovery behavior in 5N-purity tungsten and 3N-purity tantalum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5135857	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 A. Yabuuchi, S. Sakai, M. Mizuno, H. Araki, Y. Shirai	4. 巻 7
2. 論文標題 High-temperature in-situ measurements of thermal vacancies in a TiAl intermetallic compound using a desktop positron beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JJAP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011102-1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAPCP.7.011102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計54件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Akifumi Okamoto, Shigehiko Hasegaw
2. 発表標題 Magnetic and magneto optical properties of GaN/GdN superlattice structures grown by PA MBE
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium, The 18th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sanshiro Fujimori, Shigehiko Hasegawa
2. 発表標題 Magneto-optical characterization of GaN/TbN superlattice structures grown by PA MBE
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium, The 18th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤森 三志朗, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 GaN/TbN超格子構造における磁気光学特性の非磁性層幅依存性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本 旭史, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 Gd/N供給比を変化させたGaN/GdN超格子構造形成とその磁気光学的特性評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤森 三志朗, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 PA-MBE法によるSiドーピングGaN/TbN超格子構造の作製と磁気光学特性の評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 旭史, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 PA-MBE法によるGaN/GdN超格子構造形成とその磁気光学的特性評価(その2) - Gd/N比の影響 -
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Yabuuchi, T. Yoshiie, and A. Kinomura
2. 発表標題 Monte Carlo simulation of positron creation and heat generation at the KUR reactor-based slow positron beamline
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 数内敦, 義家敏正, 木野村淳
2. 発表標題 KUR低速陽電子ビームラインにおける陽電子生成シミュレーション
3. 学会等名 令和元年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Kinomura, A. Yabuuchi, K. Sato, and Q. Xu
2. 発表標題 Progress of the slow-positron beamline development at the Kyoto University research reactor
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Karatsu, A. Yabuuchi, and A. Yabuuchi
2. 発表標題 Annealing behavior of vacancy-type defects in rare-earth implanted GaN studied by a slow positron beam
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sanshiro Fujimori, Shigehiko Hasegawa
2. 発表標題 Magneto-optical characterization of GaN/TbN superlattice structures grown by PA-MBE
3. 学会等名 International workshop on nitride semiconductors 2018 (IWN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kojima, S. Hasegawa
2. 発表標題 Effect of magnetic barrier layer thickness on magnetic properties in magnetic/nonmagnetic GdN/GaN superlattices grown by PA-MBE
3. 学会等名 International workshop on nitride semiconductors 2018 (IWN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sanshiro Fujimori, Shigehiko Hasegawa
2. 発表標題 Structural and Magneto-optical characterizations of GaN/TbN superlattice structures grown by PA-MBE
3. 学会等名 The 22nd SANKEN International Symposium and The 17th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akifumi Okamoto, Yoshihito Sugeta, Shigehiko Hasegawa
2. 発表標題 Magnetic and magneto-optical properties of GaN/GdN superlattice structures grown by PA-MBE
3. 学会等名 The 22nd SANKEN International Symposium and The 17th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Maekawa, S. Sakai, K. Wada, A. Miyashita, S. Hagiwara, A. Kawasuso, A. Yabuuchi, S. Hasegawa
2. 発表標題 Magnetic Doppler Broadening Measurement on Gadolinium-doped GaN
3. 学会等名 18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤森 三志朗, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 PA-MBE法によるGaN/TbN超格子構造の作製と磁気光学特性の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島拓朗, 長谷川繁彦
2. 発表標題 PA-MBE 法による GdN/GaN 超格子構造の作製と磁気特性の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本 旭史, 菅田 好人, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 MBE法によるGaN/GdN超格子構造の成長と評価
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本旭史, 長谷川繁彦
2. 発表標題 PA-MBE法によるGaN/GdN超格子構造形成とその磁気光学的特性評価 - GdN 井戸層成長方式の検討-
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤森 三志朗, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 GaN/TbN短周期超格子形成とその磁気光学測定評価(その2) -TbN井戸層幅依存性-
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前川 雅樹, 境 誠司, 萩原 聡, 和田 健, 宮下 敦己, 河裾 厚男, 藪内 敦, 長谷川 繁彦
2. 発表標題 スピン偏極陽電子ビームを用いたガドリニウム添加窒化ガリウム薄膜の空孔誘起磁性検出
3. 学会等名 日本物理学会第73回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Yabuuchi
2. 発表標題 Vacancy-type defects study in metals by using a positron beam
3. 学会等名 3rd Kyoto Workshop on Positron Sciences (KWPS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Yabuuchi, R. Naka, T. Yoshiie, Y. Kuzuya, R. Taguchi, A. Kinomura
2. 発表標題 Development Status of the KUR Reactor-Based Slow Positron Beamline: Evaluation of Positron Source Temperature and Beam Intensity
3. 学会等名 18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Kinomura, A. Yabuuchi, K. Sato, Q. Xu
2. 発表標題 Current status and prospect of the reactor-based slow positron beamline at Kyoto University
3. 学会等名 18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kuzuya, N. Oshima, A. Kinomura, A. Yabuuchi
2. 発表標題 Performance of brightness enhancement system for the KUR slow positron beamline
3. 学会等名 18th International Conference on Positron Annihilation (ICPA-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藪内 敦, 仲 竜太郎, 義家 敏正, 葛谷 佳広, 田口 遼, 木野村 淳
2. 発表標題 KUR低速陽電子ビームラインの開発状況: 線源部温度とビーム強度に関する考察
3. 学会等名 第55回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Yanagidani, S. Hasegawa
2. 発表標題 Structural and magnetic properties of Tb-doped GaN grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy
3. 学会等名 Satellite Workshop of Kanamori Memorial Symposium -Recent Progress in Materials Science for Spintronics and Energy Applications-
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳谷諒, 長谷川繁彦
2. 発表標題 プラズマ支援MBE法によるGa <sub>1-x</sub> Tb <sub>x</sub> Nの成長と磁気特性評価
3. 学会等名 第22回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤森三志朗, 柳谷諒, 長谷川繁彦
2. 発表標題 PA-MBE法によるGa <sub>1-x</sub> Tb <sub>x</sub> Nの成長と磁気光学特性評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島拓朗, 長谷川繁彦
2. 発表標題 PA-MBE法によるGdN/GaN超格子構造の成長と磁気特性評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Yabuuchi, S. Sakai, M. Mizuno, H. Araki, Y. Shirai
2. 発表標題 High-temperature in-situ measurements of thermal vacancies in a TiAl intermetallic compound using a desktop positron beam
3. 学会等名 3rd China-Japan Joint Workshop on Positron Science (JWPS2017) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 数内敦, 木野村淳
2. 発表標題 KUR低速陽電子ビームラインパルス化装置の特性解析
3. 学会等名 第54回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Yabuuchi, T. Yoshiie, Y. Kuzuya, Y. Iwamoto, T. Sano, A. Kinomura
2. 発表標題 The estimation of positron production and heat generation in KUR beam line by PHITS
3. 学会等名 International Workshop on Positron Studies of Defects 2017 (PSD-17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 数内敦, 仲竜太朗, 義家敏正, 葛谷佳広, 田口遼, 木野村淳
2. 発表標題 KUR陽電子ビームラインのビーム強度に対する線源部の影響評価
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	数内 敦  (YABUUCHI Atsui)  (90551367)	京都大学・複合原子力科学研究所・助教    (14301)	