

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04931

研究課題名(和文) スピン偏極陽電子消滅法による空孔誘起磁性の光励起効果の解明および磁気特性制御

研究課題名(英文) Study of photoexcitation effect of vacancy-induced magnetism by spin-polarized positron annihilation method

研究代表者

前川 雅樹 (Maekawa, Masaki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：10354945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：原子空孔の局在スピンの高感度検出が可能なスピン偏極陽電子消滅法を用いて、空孔誘起磁性におけるカチオン原子空孔説から予測される窒化ガリウム(GaN)の強い磁性発現と、光照射による荷電状態変化・磁性制御を検証し、カチオン原子空孔説の妥当性を調べた。窒素イオン照射ではGaNには磁性はほとんど誘起されず、原子空孔にも顕著なスピンの局在は見られなかった。光照射による変化にも乏しく、カチオン原子単空孔の磁性誘起は非常に弱い。一方で、ガドリニウム照射で生成したGaGdNでは、空孔クラスターが発生した場合に顕著な磁性強化が検出された。空孔誘起磁性は単空孔以外の欠陥構造でも誘発されることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空孔誘起磁性は、半導体デバイスの極省電力化が期待されるスピントロニクス材料開発において注目されている現象であるが、肝心の空孔と磁性の関係はほとんど明らかになっていない。その理由の一つとして、空孔に誘起したスピンを高感度に測定できる手法が存在しなかった事がある。スピン偏極陽電子消滅(SP-PAS)法はそのような要請に答える現在唯一の方法といえる。本研究ではSP-PAS法を用いて、空孔誘起磁性の礎となっているカチオン原子空孔説の予測を検証し、より強い磁性発現への道を探った。本研究ではこれまであまり注目されてこなかった空孔クラスターの磁性への関与を明らかにし、今後の材料開発の発展に寄与した。

研究成果の概要(英文)：The spin-polarized positron annihilation method, which has high sensitivity for the electron spins associated with atomic vacancies, was used to validate the theory that cation vacancies are the origin of vacancy-induced magnetism. The strong magnetization predicted to be induced in gallium nitride (GaN) and its control by the UV light illumination was investigated. No significant excess spin was observed at the single gallium vacancies (cation vacancies) in nitrogen-implanted GaN, however, magnetization induced at vacancy clusters was detected in Gadolinium-implanted GaN. It was clarified that vacancy-induced magnetism is also induced in defect structures other than single vacancy.

研究分野：陽電子消滅

キーワード：陽電子消滅 空孔誘起磁性 スピン偏極陽電子 イオンビーム照射 d0強磁性 カチオン原子空孔 窒化ガリウム ガドリニウム注入

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

今日の高度情報化社会を支える情報機器の電力消費量は年々増大しており、半導体デバイスの低消費電力化が急務である。「スピントロニクスデバイス」は、電子のスピンの流れを制御して情報処理を行うもので、極省電力化が期待されている。スピン流は強磁性体からスピン偏極電子を取り出すことで得られる。そこで強磁性を持つ半導体材料の開発が進められている。これまでも半導体材料に強磁性元素を添加する方法が数多く試みられたが、添加元素の凝集・析出が起り、安定的に生成できる物質は限られている。この問題を解決する新しい方法として、原子空孔の導入により磁性を誘起する方法が注目されている。半導体中のカチオン原子空孔が作る欠陥準位では、通常は上向きと下向きのスピンを持つ電子が同数配置され磁化は打ち消されているが、原子空孔が隣接すると、不対電子の波動関数が相互作用し準位が分裂する。ここを電子が占める際、例えば酸化物では2つの空席が生じ、打ち消されないスピンの局所的な磁化を引き起こす。結晶全体に原子空孔が形成されていると、局所的な磁化が交換相互作用により連鎖し材料全体が強磁性化する。これが、理論的に提案されているカチオン原子空孔が磁性を生むメカニズム(カチオン原子空孔由来説)である[1]。実際に酸化亜鉛(ZnO)などの半導体材料で空孔誘起磁性が観測されているが、本当にカチオン原子空孔が偏極電子スピンを生んでいるかを示す直接的な実験的証拠は報告されていなかった。これは従来、原子空孔とスピンの両方に同時に感度を持つ測定方法が存在しなかったためである。そこで研究代表者らは「スピン偏極陽電子消滅法(SP-PAS法)」を用いてこの問題の解決に取り組んでいる。

物質に打ち込まれた陽電子が電子と出会って対消滅する際、両者がスピン偏極していると、スピン平行/反平行の違いで消滅確率が異なる。これは消滅ガンマ線エネルギー分布の強度差(磁気ドップラースペクトル: MDB)として観察され、スピン偏極電子の検出に利用できる(図1)。更に陽電子ならではの長所として、結晶中の原子空孔を高感度に検出できることがある。これらの性質を併せ持つSP-PAS法は、原子空孔にあるスピン偏極電子をまさに「同時」に検出できるため、空孔誘起磁性の研究に最適である。研究代表者らは独自開発したSP-PAS装置を用いてZnO中の欠陥誘起磁性の検出を試みたところ、カチオン空孔(亜鉛空孔)を導入したZnO結晶で明確なMDB強度を見出し、空孔誘起磁性のカチオン原子空孔由来説を裏付けた[2]。

カチオン原子空孔由来説によると、より強い磁化を得るためには、分裂準位の空席を電子が補償して局所的な磁化が消失するのを防ぎ、かつ結晶全体を磁化するための間接交換相互作用や超交換相互作用によるスピンの伝播(局所的な磁化の連鎖)が有効に働くことが必要である。そのためにはキャリア密度やフェルミ準位の制御による欠陥準位の荷電状態の制御が重要であると予測されている。研究代表者らは、半導体で培われてきたバンドエンジニアリングの手法を用いれば、空孔誘起磁性における磁性制御が可能であると考えた。

実際、SP-PAS法によるこれまでの測定では、ZnOで検出された空孔誘起磁化は0.5 μ_B 程度で、期待値の数分の一でしかない。これが伝導電子の補償によるものであるならば、欠陥準位の荷電状態変化により磁性変化が期待できる。イオン照射ではカチオン空孔のみが生成されているわけではなく、照射量増大に伴い原子空孔導入量が多くなるとフェルミ準位のピンニングにより外乱の影響が起りにくくなると予想されるため、温度制御によりフェルミ準位を制御する方法は効果的でない可能性がある。換言すれば、これは光励起による方法が磁性制御に適用できることを示唆している。また窒化ガリウム(GaN)のような窒化物では不対電子が3つ存在できることから酸化物よりも強い3 μ_B 分の磁化が期待できる(図2)。以上より、原子空孔を導入した窒化物半導体材料に光刺激を与えることで磁化状態を制御できれば、これまでよりも強い磁化を発現できる可能性がある。SP-PAS法を用いると原子空孔の荷電状態がスピン偏極電子の局在状態に与える影響を直接的に検出できるため、カチオン原子空孔説のさらなる裏付けができると考えた。空孔誘起磁性の積極的な制御、磁性強化メカニズムを明らかにし、より強力な強磁性半導体材料の開発につながると期待できる。

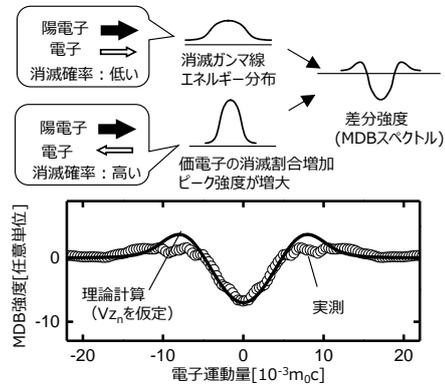


図1 スピン偏極陽電子消滅法による空孔誘起磁性の検出例。

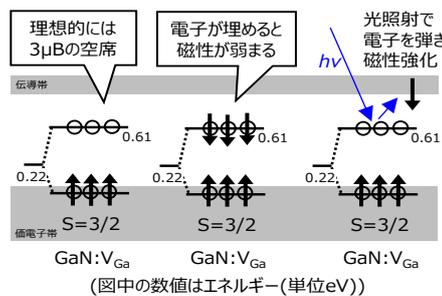


図2 GaNの空孔誘起磁性モデルと、光照射による磁性強化の概念。

2. 研究の目的

SP-PAS 法が原子空孔にあるスピンを高感度に検出できることを活かし、カチオン原子空孔説から導かれる磁性特性変化の予測、すなわち光励起による欠陥準位の荷電状態制御によって強磁性発現が変化するという予測を検証することでカチオン原子空孔説の妥当性を評価し、更に実際に磁性制御を試みることである。

3. 研究の方法

カチオン原子空孔を半導体材料に導入し空孔誘起磁性発現を試みた。本研究ではより強い磁化が期待できる物質として窒化物半導体、中でも複数の報告実績のある窒化ガリウム(GaN)に注目した。試料にはサファイア基板にエピタキシャル成長させた GaN(0001) 基板を用いた。空孔誘起磁性は、準位の補償を防ぐために p 型結晶で最大化すると考えられてきたが、一方で結晶全体にスピンを伝搬するためには伝導電子が必要であり、この観点では n 型が有利である。空孔導入には結晶成長中の組成制御による方法もあるが、本研究では空孔濃度を系統的に変化できるイオンビーム照射法を用いた。量研高崎研のイオン注入装置にて、自己イオンとなる窒素イオンを 100 keV で照射した。照射温度は室温である。原子空孔は表面から 200 nm までの深さに分布する。キャリア密度は照射量にも依存するため、照射量は $10^{15} \sim 10^{17} \text{cm}^{-2}$ の広い範囲で変化させた。照射試料は X 線回折、磁化測定(SQUID 測定)などで結晶品質の変化や磁化を調べるとともに、通常型の陽電子消滅法を用いて空孔の生成・消滅挙動を調べた。更にスピン偏極陽電子消滅法(SP-PAS)で空孔に局在する電子スピンの状態を調べた。SP-PAS 装置は研究代表者らが独自開発したものである。 ^{22}Na 陽電子線源から得られたスピン偏極陽電子ビームを、強磁場($\pm 1\text{T}$)を印加したまま試料に照射して消滅ガンマ線測定を行うことができ、磁場の印加方向を入れ替えることで空孔の磁気反応が検出できる。測定温度は室温から 20K まで可変である。本研究ではさらに、光励起による空孔荷電状態制御を導入した。GaN のバンドギャップは 3.4 eV 程度であり、カチオン原子空孔の作る準位は価電子帯の 0.22eV 上、交換分裂の準位は 0.61eV 上と計算されている(図 2) [1]。そこで既存の SP-PAS 装置にバンドギャップ相当の紫外光を照射しながら測定できる機構を構築した(図 3)。光源には 3W の紫外発光パワー LED (波長 365 nm) を用い、試料直近に配置することで光束を確保した。光密度はレーザーに劣るが、陽電子ビームが連続ビームであるため、連続発光できる LED 光が有利である。GaN で空孔誘起磁性が発現するか、また光制御により空孔誘起磁性が変化するかどうかを検証した。

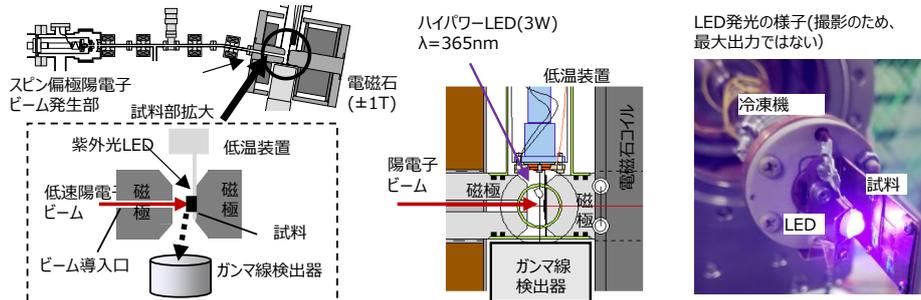


図 3 開発した紫外光照射下・磁場印加下スピン偏極陽電子消滅測定装置。

4. 研究成果

(1) SP-PAS 装置の高性能化

前述のとおり、これまで原子空孔を導入した ZnO 単結晶の空孔誘起磁性測定を行ってきた。原子空孔に発現する磁性の強さは、SP-PAS 測定で得られる MDB スペクトルの強度増大として検出されるが、測定された MDB 強度は第一原理計算から期待される値の数分の 1 であり、これが試料由来なのか装置由来なのかは不明であった。MDB スペクトルの変化は本来的に微弱であり、明確な差を捉えるためには高い統計精度が必要である。そこで光励起実験に先立ち、まず陽電子ビーム装置の改良を行った。特に問題であったのが陽電子ビーム強度であったため、線源量を 215 MBq に増量し、かつスピン偏極率を確保した新しい ^{22}Na 陽電子線源を開発した。陽電子は線源から放出された方向にスピン偏極しているため、高スピン偏極率を実現するためには、ある特定の方向に放出された陽電子だけを選別する必要がある。通常の陽電子線源は $^{22}\text{NaCl}$ を重金属トレイの上に析出させて製作する。これは反対方向に放出された陽電子を重金属で反射させて強度を稼ぐのに有効であるが、これではスピン偏極率が負の成分が大量に混入するためスピン偏極率を確保できない。そこで本装置では、陽電子の反射が少ない軽元素(炭素)トレイを開発し [3]、スピン偏極率 30 % を達成しながら計数率を 10 倍増することに成功した。加えて、強磁場印加状態でのその場ビーム観測技術を開発した。毎秒 10 万個程度しかない陽電子ビームはマイクロチャンネルプレート(MCP)による増倍なしに観察できない。本装置では高磁場印加のための磁極間隔が 15 mm 程度と狭く、20 mm 厚の MCP を設置できないため、磁場印加状態で陽電子が正しく試料に照射されているか不明であった。そこで磁極中に設置した厚さ 1 mm の蛍光板を高

感度カメラで撮影し、画像処理によって長時間蓄積する手法を開発し、高磁場印加下での陽電子ビーム形状の可視化に成功した。その結果、陽電子は正しく試料に照射されており、ビームサイズも 0.1 mm 程度と非常によく収束されていることが明らかとなった(図 4)。標準試料である強磁性金属材料の再測定では予想された MDB スペクトル強度が得られ、MDB スペクトル強度が弱い理由は装置由来ではないことが確認された。また計数率の向上に伴い測定時間が短縮化されたことで、従来では行えなかった MDB スペクトルの深さ方向分解測定が可能となり、深さ分布を伴うイオン照射試料であっても最適深さを選択できるようになった。ZnO 試料の再測定を行った結果、やはり MDB 強度は理論予測ほど強いものではなく、何らかの試料由来の要因によるもの(当初の考え通り、欠陥準位を伝導電子が埋めることでスピン偏極が打ち消されている等)であることが明らかとなった。

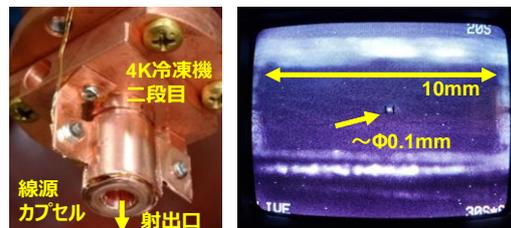


図 4 (左) 新開発した高強度スピン偏極陽電子線源、および(右)蓄積型高感度カメラで捉えられた蛍光板上の陽電子ビーム。スポットサイズ 0.1mm 程度に収束されている。

(2) 窒素照射窒化ガリウムの空孔誘起磁性及び光照射効果の検証

窒化ガリウム(GaN)のような窒化物では不対電子が最大 3 つ存在できることから、ZnO のような酸化物よりも 1.5 倍より強い $3\mu_B$ 分の磁化が予想されている。そこで窒素照射 GaN 試料を作製し、カチオン原子空孔を導入して空孔誘起磁性の検出を試みた。陽電子消滅測定では、明確なカチオン原子空孔(ガリウム空孔)の導入が確認されたものの、予想に反し SQUID 測定や SP-PAS 測定では磁化がほとんど検出されなかった[4]。図 5 には SP-PAS 法による窒素照射 GaN の欠陥局在スピン測定結果の一例を示す。これは 10^{15}cm^{-2} 照射した n 型 GaN の正負磁場 S パラメータ差 (20 K で測定) の陽電子打ち込みエネルギー依存性であり、空孔誘起磁性の深さ依存性と等価である。欠陥局在スピンがある場合は S パラメータ差が増大するが、窒素イオン注入領域 (5~7keV 付近) を始めとする全深さ領域で明確な差異を検出するに至らなかった。結晶の伝導型による違いも殆ど見られていない。

GaN で空孔誘起磁性がほとんど発現しない理由として、①欠陥準位を電子が埋めることでスピン偏極が消失している、②欠陥スピン同士の交換相互作用が反強磁性的である、③別の欠陥構造が関与している、などがある。そこで光照射下測定を行い、欠陥に捉えられた電子を弾き飛ばして磁性が発現するかを調べた。結果の一例を図 6 に示す。上段は窒素イオンを 10^{15}cm^{-2} 照射した試料に対する MDB スペクトルの紫外線照射効果を示したものである。陽電子の打ち込みエネルギーは 6keV、測定温度は 20K である。暗黒中(紫外線 off)では、MDB スペクトルに明確な反応(図 1 のような)は見られていない。紫外線照射下であっても MDB 強度に増大は見られず、顕著な磁性増強を検出するには至らなかった。図には示していないが、照射量依存性や測定温度依存性もほとんど見られなかった。図 6 下段には S パラメータ差の陽電子打ち込みエネルギー依存性を示す。多少のばらつきはあるものの、明確に差と言えるような系統的な変化を検出するに至らなかった。本研究では光照射による磁性反応には当初期待したような挙動を得ることができず、窒化物半導体の空孔誘起磁性の磁性制御には至らなかった。窒化物半導体では誘起スピン同士に反強磁性結合が作用して平均的にゼロになっているか、そもそも GaN 中のガリウム空孔は磁性に無関与であると考えられる。窒化物半導体で空孔誘起磁性が出る場合は、単空孔ではなく別の欠陥構造が関与している可能性が考えられる。本研究で開発した光照射機構では光密度が不足していた可能性はある。しかしレーザーのような強力な光を利用するためには陽電子ビームをパルス化してレーザー駆動に同期させる必要があり、現状の陽電

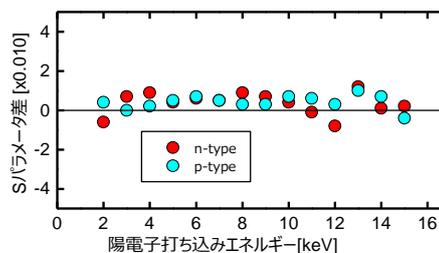


図 5 窒素照射 GaN の S パラメータ差の陽電子打ち込みエネルギー依存性 (空孔誘起磁性の深さ依存性と等価)。

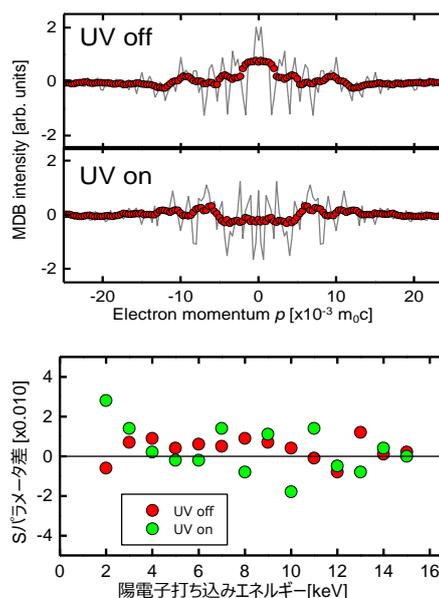


図 6 窒素イオン照射 GaN の SP-PAS スペクトル紫外線照射効果。(上)MDB スペクトル、(下) S パラメータ差の陽電子打ち込みエネルギー依存性。

子ビーム装置では容易ではないため将来の課題としたい。

(3) Gd 注入 GaN の空孔誘起磁性評価

GaN の自己イオン照射(窒素照射)では強い空孔誘起磁性現象は見られなかった。そこでより強い磁性反応が望める材料としてガドリニウム(Gd)照射 GaN 試料(GaGdN)を試した。これは室温強磁性半導体として期待されている材料である。GaGdN では導入した Gd イオンの何千倍もの磁化が発現する巨大磁化が報告されており、原因は明らかではないものの、原子空孔の関与が挙げられている。Gd 原子と同時に導入された空孔が余剰の磁化を発現する、あるいは Gd 原子の磁化を介在して結晶全体の強磁性化に寄与する、などのモデルが考えられているが、定かではない。そこで我々は、Gd イオン注入 GaN を SP-PAS 法で調べ、空孔誘起磁性の検出を試みた。量研高崎研のイオン注入装置を用いて n 型 GaN 薄膜試料に 370 keV の Gd イオンを打ち込んだ(打ち込み深さ 100 nm 程度)。照射量は $10^{12} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ で、照射後に大気中で 900 度の熱焼鈍を行った。試料作成後の SQUID 測定では照射直後から磁性が発現し、焼鈍により更に増強されることを確認した(図 7)。陽電子消滅測定では、照射直後はガリウム空孔や空孔クラスターが混在していたものの、熱焼鈍によりガリウム単空孔はほぼ消失し、代わりに 8~12 原子程度の空孔クラスターが生成していることが確認された。SP-PAS 測定では、Gd 注入深さに相当する 3~5keV 付近の入射エネルギーで磁性反応を検出し、空孔クラスターが多く形成された熱焼鈍度後の 10^{15} cm^{-2} 照射試料で顕著であった(図 8)。MDB スペクトルの詳細測定と、いくつかの欠陥構造モデルを模擬した第一原理計算結果との比較から、この磁性の源は 12 原子空孔クラスター(V_{12})であることがわかった(図 9) [5]。第一原理計算では、 V_{12} 空孔クラスターと Gd 原子の近接では磁性が現れず、 V_{12} 空孔クラスター同士が近接した状態で $2\mu\text{B}$ の自発磁化が現れた。一方で、前章で見たように単空孔だけを導入した場合には磁化は発現しないことから、GaGdN では空孔クラスターが誘起する磁化と注入された Gd が持つ磁化が合わさって巨大磁化を発現していると考えられる。

(4) まとめ

カチオン原子空孔説で唱えられている磁性の源は単独原子空孔であるが、単純な原子空孔を導入した GaN ではほとんど検出されなかった。光照射に対する応答にも乏しく、空孔の荷電状態が空孔誘起磁性に強く作用する様子は捉えられなかった。一方で GaGdN では空孔クラスターに付随するスピン偏極が磁化を生み、巨大磁化の発生に関与していることがわかった。カチオン原子空孔説を模擬する第一原理計算では均質に原子空孔が分散している原子モデルが用いられている(それによって相関相互作用が有効に働く)が、実際の物質では均一に配置されておらず、むしろ実験的に生成されやすい空孔クラスターが磁性発現に寄与している可能性がある。本研究で得られた結果は、カチオン原子空孔説を直ちに否定するものではないが、より高次の原子空孔構造をも考慮する必要があることを示している。以上の結果は、いくつかの科学論文や学会発表にて公表し、空孔誘起磁性や強磁性半導体に関連する研究者へ情報提供を行った。今後のスピントロニクス材料開発の発展、ひいては低消費電力デバイス開発へ寄与した。また SP-PAS 装置の高性能化も達成できたことで、陽電子ビーム測定技術の高度化にも寄与した。

<引用文献>

- [1] O. Volnianska and P. Boguslawanski, Phys. Rev. B **83** (2011) 205205.
- [2] M. Maekawa et.al., Appl. Phys. Lett., **110**(2017) 172402-1-5.
- [3] M. Maekawa et.al., Nucl. Instr. Methods B **480**(2020) 49-55.
- [4] M. Maekawa et.al., e-J. Surf. Sci. Nanotech. **16** (2018) 347-350.
- [5] M. Maekawa et.al., Phys. Rev. B **102**, 054427 (2020).

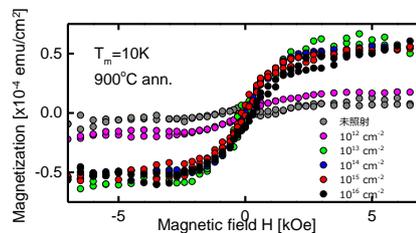


図 7 照射後に 900 度で熱焼鈍した Gd 注入 GaN の磁化測定結果。

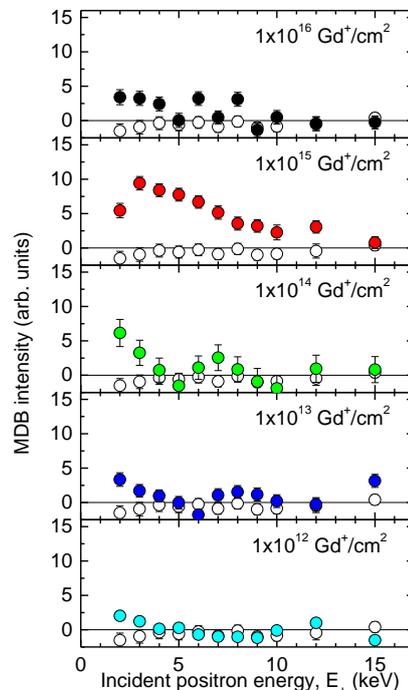


図 8 Gd 照射 GaN の MDB 強度の入射陽電子エネルギー依存性。

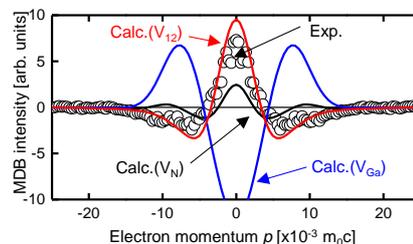


図 9 Gd 照射 GaN の MDB スペクトル(白丸)及びいくつかの欠陥モデルを想定した第一原理計算結果。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 M. Maekawa, S. Sakai, K. Wada, A. Miyashita and A. Kawasuso	4. 巻 QST-M-23
2. 論文標題 Vacancy-induced magnetism in Gd-doped GaN film probed by spin-polarized positron beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 QST-Takasaki annual report 2018	6. 最初と最後の頁 106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -
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 Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 50007
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Maekawa Masaki, Sakai Seiji, Miyashita Atsumi, Kawasuso Atsuo	4. 巻 16
2. 論文標題 Spin-Polarized Positron Annihilation Measurement on Ga Vacancies in p-type GaN	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 347 ~ 350
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1380/ejssnt.2018.347	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 -
1. 著者名 Wada K., Miyashita A., Maekawa M., Sakai S., Kawasuso A.	4. 巻 1970
2. 論文標題 Spin-polarized positron beams with ^{22}Na and ^{68}Ge and their applications to materials research	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 40001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5040213	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 -

1. 著者名 M. Maekawa, S. Sakai, K. Wada, A. Miyashita and A. Kawasuso	4. 巻 QST-M-16
2. 論文標題 Vacancy-induced magnetism in GaN film probed by spin-polarized positron beam	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 QST-Takasaki annual report 2017	6. 最初と最後の頁 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Maekawa M., Miyashita A., Sakai S., Kawasuso A.	4. 巻 102
2. 論文標題 Gadolinium-implanted GaN studied by spin-polarized positron annihilation spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 54427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.054427	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 -

1. 著者名 Maekawa Masaki, Wada Ken, Kawasuso Atsuo	4. 巻 480
2. 論文標題 Development a new positron source for spin-polarized positron beam generation	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 49 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2020.08.001	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 -

1. 著者名 M. Maekawa, S. Sakai, A. Miyashita and A. Kawasuso	4. 巻 QST-M-29
2. 論文標題 Vacancy-induced Magnetism in Gd-doped GaN Film Probed by Spin-polarized Positron Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 QST-Takasaki annual report 2019	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 前川雅樹、境誠司、和田健、宮下敦巳、河裾厚男
2. 発表標題 スピン偏極陽電子ビームを用いた磁性元素添加半導体材料の空孔誘起磁性評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前川雅樹、境誠司、和田健、宮下敦巳、河裾厚男
2. 発表標題 スピン偏極陽電子ビームによるガドリニウムイオン照射窒化ガリウム薄膜の空孔局在電子スピン評価
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前川 雅樹, 和田 健, 萩原 聡, 宮下 敦巳, 境 誠司, 河裾 厚男
2. 発表標題 スピン偏極陽電子ビームを用いた金属酸化物・窒化物の空孔誘起磁性検出
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川 雅樹, 境 誠司, 萩原 聡, 和田 健, 宮下 敦巳, 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 日本物理学会参加(2018年秋季大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川 雅樹, 和田 健, 萩原 聡, 宮下 敦巳, 境 誠司, 河裾 厚男
2. 発表標題 スピン偏極陽電子ビームによるイオン照射窒化ガリウム薄膜の空孔局在電子スピン評価
3. 学会等名 QST 高崎サイエンスフェスタ2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川 雅樹, 境 誠司, 和田 健, 宮下 敦巳, 藪内 敦, 長谷川繁彦
2. 発表標題 Magnetic Doppler Broadening Measurement on Gadolinium-doped GaN
3. 学会等名 18th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前川 雅樹, 境 誠司, 宮下 敦巳, 河裾 厚男
2. 発表標題 スピン偏極陽電子消滅法によるガドリニウム注入窒化ガリウム薄膜の空孔誘起電子スピン評価
3. 学会等名 QST 高崎サイエンスフェスタ 2020
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------