

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21360023

 研究課題名（和文） スピン依存弾道電子マッピング法の開発と半導体へのスピン注入機構の  
 解明

 研究課題名（英文） Study on spin dependent ballistic electron mapping and spin injection  
 into semiconductors

研究代表者

長谷川 繁彦 (HASEGAWA SHIGEHICO)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：50189528

研究成果の概要（和文）：走査型トンネル顕微鏡を用いたスピン依存弾道電子マッピング法に必要な要素技術である、スピン注入源である強磁性電極材料の選定と評価、スピン検出を行う希薄磁性半導体の創製と評価、弾道電子マッピング測定法・解析法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：We have investigated structural, electrical, and magnetic properties both of ferromagnetic electrodes on GaN as spin injectors and of III-nitride based dilute semiconductors as spin detectors toward development of ballistic electron emission mapping measurement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2012年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：半導体スピントロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：走査型トンネル顕微鏡，スピンエレクトロニクス，分子線エピタキシー，希薄磁性半導体，トンネル現象，スピン依存状態密度，ショットキー接合

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電子の持つ電荷の制御を基礎とした従来の半導体エレクトロニクスに電子のスピン自由度を加えるスピントロニクスは、新たな物理現象の発現や新たな機能デバイスの創製が期待されている分野である。半導体による室温動作のスピントロニックデバイスの実現への課題として、半導体へのスピン注入高効率化、スピン輸送、スピン制御、スピン検出などがある。いずれも重要であるが、スピン注入高効率化がデバイス実現への牽引車と目されるため、近年、国内外を問わず盛

んに研究されている。その方法として大きく二つに大別できる。一つは、室温強磁性半導体の創製であり、他方は強磁性金属からのスピン注入である。前者では、得られた磁性半導体薄膜の磁気特性をナノスケールで評価し、その特性向上が不可欠である。後者の場合、スピン注入効率が低く、金属/半導体界面構造についてのナノスケールでの理解が必要となっている。

(2) 申請者らは、室温での磁化特性にヒステリシスの現れる希薄磁性半導体を創製して

きたが、その磁気的特性向上には、ナノスケールでの磁気的特性の理解が必要と考え、本手法の提案に至った。研究の方法でも述べるが、本手法の開発は大きく3つの要素技術から成るが、その一つが希薄磁性半導体の特性向上そのものに他ならない。

## 2. 研究の目的

(1) 走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いたスピン依存弾道電子マッピング法の開発のために必要な要素技術を確立する。

(2) 強磁性金属/III 族窒化物ベース半導体構造についての電氣的・磁気的特性評価を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いたスピン依存弾道電子マッピング法の開発のために必要な要素技術として、スピン注入源である強磁性電極材料の選定と評価、スピン検出を行う希薄磁性半導体の創製と評価、弾道電子マッピング測定法・解析法の開発の3つに大きく分けられる。そこで、下記の方法で実施した。

(2) 強磁性金属である Fe, Co 薄膜を GaN 上に形成し、STM およびスピン偏極 (SP) STM により、その表面形状を評価するとともに表面での磁気特性を反映した知見を得る。反射高速電子回折、磁気測定、電気測定から巨視的 (バルク) としての結晶構造、電氣的・磁気的特性を調べ、両者の結果から、半導体へのスピン注入源としての強磁性金属電極の特性を評価する。

(3) 強磁性金属/GaN 接合を弾道電子放射顕微鏡 (BEEM) 法で測定し、その測定法 (プログラムも含めて) の開発を行う。得られた BEEM 電流-電圧特性の解析法を開発を行う。

(4) プラズマ支援分子線エピタキシー (PA-MBE) 成長法にて、III 族窒化物ベース希薄磁性半導体 GaGdN を成長し、その結晶構造、電氣的・磁気的特性を評価する。スピン依存弾道電子マッピング法でのスピン検出について検討する。

## 4. 研究成果

(1) GaN 上への強磁性金属ナノ構造の形成と走査型トンネル顕微鏡 (STM) による評価

強磁性金属から半導体へスピンを注入する上で、金属/半導体ショットキー接合を形成するか、もしくは金属/絶縁体/半導体 (MIS) 構造によるトンネル障壁を形成する必

要がある。ここでは、強磁性金属として Fe と Co を選び、条件を変えて Fe/GaN, Co/GaN 接合を形成した。

Fe/GaN 接合を室温で形成した場合、ナノスケールのドットを形成するが、その形状や GaN(0001) 面とのエピタキシャル関係は Fe (平均) 膜厚に依存していた。1nm 未満では平均粒径 3nm 程度のドットが多結晶状態で表面を一様に覆っていた。その後、 $\alpha$ -Fe ドットが (110)  $[1-11]_{\text{Fe}} // (0001) [11-20]_{\text{GaN}}$  なる KS エピタキシャル関係で成長し、さらなる膜厚の増加に伴い (110)  $[001]_{\text{Fe}} // (0001) [11-20]_{\text{GaN}}$  なる NW エピタキシャル関係を持つドット形成へと変化した。また平均粒径も 3nm, 5nm と大きくなり形状も球状から楕円体へと変化した。Fe 薄膜の磁気特性もこの結晶状態を反映して変化し、平均膜厚が 1nm 以下では飽和磁化が小さくヒステリシスも不鮮明で超常磁性状態にあると考えられる。平均膜厚が 1nm となって KS や NW 方位関係を持つドットの形成にともなって鮮明なヒステリシスが観測され飽和磁化  $M_s$  も Fe 本来の値となった。しかし残留磁化  $M_r$  は小さく  $M_r/M_s$  が 10% 程度であった。

これらの表面について、STM および SP-STM による電流像トンネル分光 (CITS) 測定をおこなった。粒径 3nm であっても  $E_F$  付近に有限の状態密度があることから金属であること、NW 方位関係では3つの等価なドメインが存在するために SP-STM で得た I-V 特性は異なっていることが明らかとなった。このことを反映して  $M_r/M_s$  が小さくなったと考えられる。

高温 (430, 560°C) で成長した場合、平均膜厚 1nm でも KS 方位関係の Fe が島状成長し、島表面は原子尺度で平坦性が良く、また平均粒径は 20nm 程度であった。その表面から SP-STM による CITS 測定から得た典型的な凹凸像とその電流像 ( $V_s = +0.49$  V) を図 1 に示す。コントラストの異なる島があることが見て取れる。GaN(0001) 上では6つの等価な KS 方位関係を持つ島が存在することを反映している。つまり、GaN(0001) 面内で、Fe の磁化容易軸である  $[001]$  方向が島によって異なるため、トンネル磁気抵抗に差が現れたと考えられる。

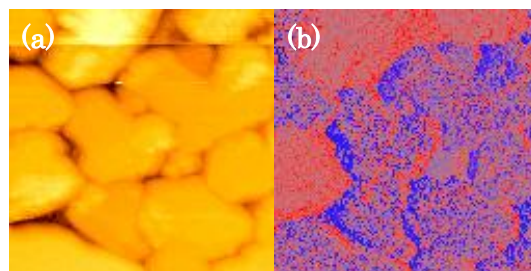


図 1. GaN(0001) 上に 560°C で成長した Fe アイランドの SP-STM 測定. (a) 凹凸像 (109 nm x 109 nm),  $V_s = -0.8$  V. (b) 電流像,  $V_s = +0.49$  V.

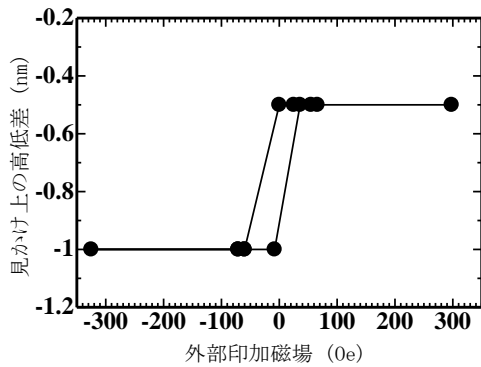


図2. GaN(0001) 上に室温形成した Fe ドット薄膜の SP-STM による評価. 多結晶ドット領域と NW ドット領域間における見かけ上の高低差の外部磁場依存性.

多結晶 Fe ドットと NW 方位関係の Fe ドットが混在した表面について、外部印加磁場を変えながら SP-STM により凹凸像を測定した。図2に、その両者間の高低差を印加磁場の関数として示した。その高低差は磁場に対してヒステリシスを描いている。これは、両者間での磁場応答の違いを反映しており、その差がトンネル電流の差として現れたためと考えられる。

室温で作製した Fe/n-GaN 接合の電流-電圧 (I-V) 測定を行ったところ、ショットキー特性を示し、障壁高さは 0.1eV となった。420°C で加熱すると障壁高さは  $0.5 \pm 0.05$  eV と増加した。

Co/GaN 接合についても検討した。室温成長の場合、平均膜厚 8nm までは fcc 構造の  $\beta$ -Co が  $(111) [-110]_{\text{Co}} // (0001) [11-20]_{\text{GaN}}$  なるエピタキシャル関係でドーム状のドットとして成長すること、それ以降 hcp 構造 ( $\alpha$ -Co) が混在し始め、膜厚増加とともに hcp 構造が増加する傾向が見られた。平均粒径も 2nm から 14nm へと増大した。 $\beta$ -Co (2nm) 薄膜では面内磁気異方性がみられ、磁化容易軸は  $\langle 110 \rangle$  と考えられる。この薄膜でも等価なエピタキシャル関係を持つドメインが3つあるが、 $\langle 110 \rangle$  方向は揃うため、磁化方向も揃っていると考えられる。また、室温成長 (平均膜厚: 2~6nm) の後に 300°C で加熱すると、原子尺度で平坦性の良い Co 薄膜が得られることが明らかとなった。

Co/n-GaN 接合についても I-V 測定を行った。室温成長 Co/GaN 接合はショットキー特性を示し、障壁高さは 1.0 eV となった。一方、室温成長後 300°C 加熱で形成した Co/GaN 接合はオーミック特性を示した。

これらの結果から、Fe/GaN ならびに Co/GaN 接合によるスピン注入について検討した。室温成長ならびに高温成長 Fe/GaN 接合では、多数の結晶ドメインが存在するため零磁場ではスピン偏極率が小さくなる可能性が高い。このことは残留磁化が小さいことから

明らかである。室温成長 Co/GaN 接合では、3つの等価なドメインがある。が、Co/GaN 界面での原子配列関係は同じであり、磁化容易軸も同じとなることから、ドメインの存在がスピン偏極率を損なうことはない。ただ、表面平坦性が悪いため、弾道電子マッピングの際に影響が生じると考えられる。一方、300°C 加熱 Co/GaN 接合では、表面平坦性は良いがオーミック接触のため、Co と GaN との電気伝導度不整合により接合を流れる電流のスピン偏極率は極端に小さく見積もられる。

以上のように、STM および SP-STM と、結晶構造、電気的・磁気的特性の巨視的評価法を併用することにより、半導体へのスピン注入源としての強磁性金属電極の特性を評価できることを示した。

## (2) 弾道電子マッピング法による Co/GaN 界面の評価

室温成長 Co/GaN 接合に対して弾道電子放射顕微鏡 (BEEM) 法を用いて評価した。測定配置図を図3に示す。電気特性評価でショットキー接合形成が確認出来ている平均膜厚 2nm の Co 膜に対して行った。図4に、STM 電流-電圧 (I-V) 特性と BEEM 電流-電圧 (I-V) 測定を示す。

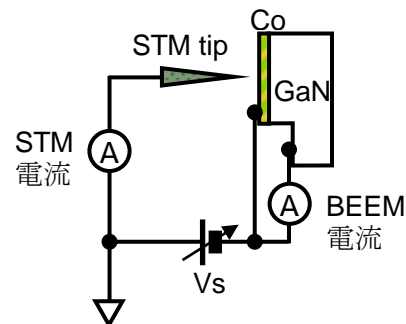


図3. BEEM 測定の概略

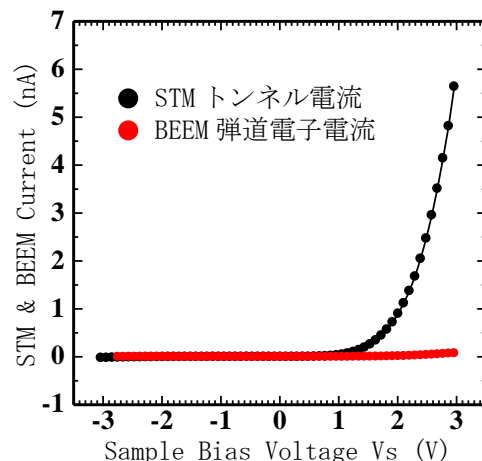


図4. 弾道電子放射顕微鏡により室温成長 Co (2nm)/GaN (0001) 接合に対して得られたトンネル電流-電圧 (STM I-V) 特性と弾道電子電流-電圧 (BEEM I-V) 特性.  $V_s = 2.0$  V,  $I_t = 1$  nA で真空ギャップは固定した。



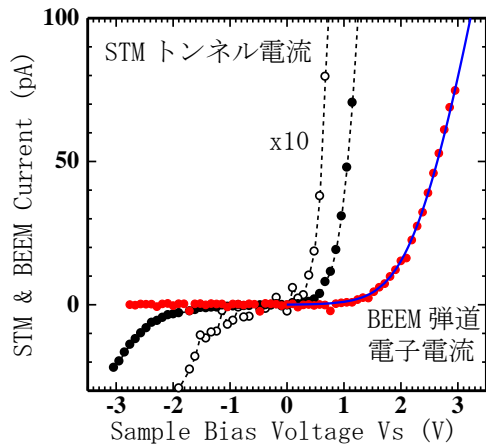


図 5. トンネル電流-電圧 (STM I-V) 特性と弾道電子電流-電圧 (BEEM I-V) 特性の定電流領域の拡大図.

図 5 に、低電流領域の拡大図を示した。赤丸は BEEM 電流で、黒丸は STM 電流、白丸は STM 電流を 10 倍拡大して示した。STM 電流の破線はアイガイドである。この図から、STM 電流と BEEM 電流では大きな違いのあることが分かる。BEEM 電流は負の試料バイアス電圧 ( $V_s$ ) 側では全く流れていない。n-GaN であることから、ショットキー特性を示していると推察できる。一方、STM 電流は  $V_s < 0$  側でも流れ、また、 $V_s = 0$  V 付近での電流変化を見るとその傾き ( $dI_T/dV_s$ ) が 0 となっていない。このことは  $E_F$  に状態密度があること、つまり、金属であることを示している。

さて、BEEM 電流-電圧特性からショットキー障壁高さ  $\phi_B$  を求める。通常のショットキーダイオードの場合には、順方向電流密度  $J_s$  の片対数プロットから飽和電流密度を求め、

$$J_s = A^* T^2 \exp(-q\phi_B / kT)$$

を使って障壁高さを求めるのが一般的である。この方法では熱電子放出過程を仮定しているため、低電圧領域における結果を用いる。BEEM 電流の場合、図 5 から分かるように、 $V_s < 1$  V では pA オーダー以下の電流のため、信頼ある結果は望めない。また、BEEM 測定では  $V_s$  そのものがショットキー接合に印加されている保証もない。そこで、理想因子  $n$  および寄生抵抗も含んだ式でフィッティングを行った。その結果を図 5 中に青線で示した。ショットキー障壁高さは  $0.4 \pm 0.05$  eV であった。また、 $n$  値は 10 前後と大きくなったが、これは、電圧がショットキー障壁とトンネル障壁の両方に印加されている、界面準位がある、寄生抵抗がある、ことなどが考えられる。

### (3) Fe (110)/GaN(0001) 界面で得られるスピン偏極率の計算

Fe (110)/GaN(0001) 界面で得られるスピン偏極率は、そのバンド構造から 0.3 程度と見積もられる。より高効率なスピン注入に向け

て  $Fe_{1-x}Co_x$  合金を用いた場合についてバンド計算を行い検討した。その結果、フェルミ準位での状態密度から見積もると、 $x=0.78$  (bcc 構造をとる最大の  $x$ ) で -0.8 程度と大幅に改善されることを見出した。磁化とは逆のスピンが注入できることを示しており、興味深い電極材料である。

### (4) GaN ベース半導体に適した強磁性金属電極材料の検討

強磁性金属電極から GaN ベース半導体へスピン注入を行う上で、ショットキー接合を形成すること、スピン偏極率の高いバンド構造を有すること、GaN 上にエピタキシャル成長すること、複雑なドメイン構造をとらないこと、などの条件を満たす強磁性金属材料を選定する必要がある。デバイスへの応用や BEEM による評価を行うには、さらに、残留磁化が大きい、適度な保磁力を有する、数 nm 程度の膜厚でも連続膜を形成する、化学的に不活性である、電気伝導度が高い、原子尺度で表面平坦性がよい、などの条件が加わる。そのような条件を満たす材料として窒化鉄 ( $\gamma'$ - $Fe_4N$ ) を取り上げて検討した。

GaN(0001) を  $300^\circ\text{C}$  に保ち、Fe とプラズマで活性化した窒素を同時供給すると、 $\gamma'$ - $Fe_4N$  がエピタキシャル成長することを見いだした。 $\gamma'$ - $Fe_4N$  の結晶構造は、fcc 構造である  $\gamma$ -Fe の体心位置に 1 個の N 原子が入り込んだペロブスカイト構造をとることが分かっている。上記の方法で GaN(0001) 上に形成した場合、GaN(0001) [11-20]// $Fe_4N$ (111) [1-10] なるエピタキシャル関係で成長していることが反射高速電子回折の解析から明らかとなった。その表面を STM で評価したところ、原子尺度で平坦で原子ステップが観測されている。この  $\gamma'$ - $Fe_4N$  薄膜は、室温で強磁性を示す、磁化の容易軸は面内にある、飽和磁化  $M_s$  は  $1500 \text{ emu/cm}^3$  程度、 $100 \text{ Oe}$  程度の保磁力を有する、 $M_s$  に対する残留磁化の比 ( $M_r/M_s$ ) は 85%、などの磁気特性を有していることが分かった。理論計算によれば、 $\gamma'$ - $Fe_4N$  はハーフメタルとの報告もあり、また窒化物である GaN にとって成膜時の整合性も良く、GaN ベース半導体へのスピン注入電極として有望な材料と言える。

作製した  $\gamma'$ - $Fe_4N$ /GaN 接合に対して電流-電圧測定を行い、 $\gamma'$ - $Fe_4N$ /GaN 接合はショットキー特性を示し、その障壁高さは  $0.7 \sim 0.8$  eV であることを明らかにした。

Fe 酸化物についての検討も行った。GaN 上に形成した Fe ドットを酸化すると、Fe 酸化物で覆われた表面を持つ Fe ナノドット構造が形成できることを見いだした。この構造体では、低温での磁化曲線で二重ヒステリシスループが観測され、表面の Fe 酸化物が反強磁性となり、内部の Fe との間に交換バイア

スが働いていることとして理解される。

#### (5) 希薄磁性半導体 GaGdN の評価

成長条件を変えて GaGdN 薄膜を GaN テンプレート上に成長した。Ga リッチ条件下では、GaN より長い c 軸を持つ薄膜がコヒーレントに成長するのに対して、N リッチ側では、析出が起こり Gd が GaN 内に取り込まれにくくなることを明らかにした。このことは GaN と GdN の標準生成エンタルピーで解釈できる。

前者の Ga リッチ下で Gd 濃度の異なる GaGdN 薄膜を GaN テンプレート上に成長したところ、 $x$ -GdN モル分率が 5%以上の薄膜内には自然超格子が形成されていることを見出した。GdN モル分率が c 軸方向に沿って周期的に変化しており、その周期は 1nm で c 面間隔の 4 原子層を単位としている。また、低温でプレーナホール効果の測定に成功した。このことは、キャリアと Gd の持つ局在磁気モーメントが相互作用していることの証であり、GaGdN はキャリア誘起強磁性であることを示し得た。この薄膜では、電気伝導特性はモット式に従うことから、Gd 添加により局在領域が出来てその間を可変領域ホッピング型で伝導していると考えられる。この結果は、自然超格子形成と関連していると考えられる。また、縦磁気抵抗測定から、低磁場領域で正の磁気抵抗効果を見られた。前者は Gd の局在磁気モーメントと伝導電子との間にスピン軌道相互作用が働いている証拠である。後者は、磁場印加により時間反転対称性が破れたことによると考えられる。磁化の温度依存性においても、超常磁性的な振る舞いがみられ、局在磁気モーメントを持つ Gd の配列(もしくは分布)を反映していると考えられる。また、薄膜のバンド端発光ならびに欠陥由来の発光について調べ、Gd 添加によりバンドギャップが少し小さくなること、薄膜に歪みが導入されていることなどを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- ① S. Sano, S. Hasegawa, Y. Mitsuno, K. Higashi, M. Ishimaru, T. Sakurai, H. Ohta, H. Asahi, Growth parameter dependence of structural, electrical and magnetic properties in GaGdN layers grown on GaN(0001), J. Crystal Growth (2013) in press, 査読有。
- ② K. Higashi, S. Hasegawa, S. Sano, Y. K. Zhou, H. Asahi, Photoluminescence properties in GaGdN grown on GaN(0001) by PA-MBE, J. Crystal Growth (2013) in press, 査読有。
- ③ Y. K. Zhou, M. Almokhtar, H. Kubo, N.

Mori, S. Emura, S. Hasegawa, H. Asahi, Observation of large Zeeman splitting in GaGdN/AlGaN ferromagnetic semiconductor double quantum well superlattices, Solid State Commun. **152**, 1270-1273 (2012), 査読有。

- ④ K. Higashi, S. Hasegawa, D. Abe, Y. Mitsuno, S. Komori, F. Ishikawa, M. Ishimaru, and H. Asahi, Coherent growth of GaGdN layers with high Gd concentration on GaN(0001), Appl. Phys. Lett. **101**, 221902 (2012), 査読有。
- ⑤ M. Ishimaru, K. Higashi, S. Hasegawa, H. Asahi, K. Sato, and T. J. Konno, Strong atomic ordering in Gd-doped GaN, Appl. Phys. Lett. **101**, 101912 (2012), 査読有。
- ⑥ M. Almokhtar, S. Emura, Y. K. Zhou, S. Hasegawa, and H. Asahi, Structural, magnetic and optical studies of ultrathin GaGdN/AlGaN multiquantum well structure, phys. stat. sol. (c) **9**, 737-740 (2012), 査読有。
- ⑦ S. Hasegawa, S. Komori, K. Higashi, D. Abe, Y.-K. Zhou, and H. Asahi, Effect of growth conditions on magnetic and structural properties in Gd-doped GaN layers grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy, phys. stat. sol. (c) **9**, 741-744 (2012), 査読有。
- ⑧ Y. K. Zhou, S. W. Choi, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa, and H. Asahi, Structural and magnetic properties of GaGdN/GaN superlattice structures, Thin Solid Films **518**, 5659-5661 (2010), 査読有。
- ⑨ Y. Honda, S. Hayakawa, S. Hasegawa, H. Asahi, Growth and characterization of Fe nanostructures on GaN, Appl. Surf. Sci. **256**, 1069-1072 (2009), 査読有。

〔学会発表〕(計 18 件)

- ① S. Hasegawa, Y.-K. Zhou, and H. Asahi, MBE Growth and Characterization of GaN-based Dilute Magnetic Semiconductor Nanostructures, 2012 Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), (December 11-14, 2012 Orlando, USA), A13. (Invited)
- ② S. Hasegawa, Y.-K. Zhou, and H. Asahi, Growth and characterization of III-nitride based dilute magnetic semiconductors and their nanostructures, 2012 Energy Materials Nanotechnology Fall Meeting, (October 22-26, 2012 Chengdu, China). (Invited)
- ③ Y. K. Zhou, Y. Nakatani, M. Sano, S. Emura,

- S. Hasegawa, H. Asahi, Novel properties in GaN-based ferromagnetic semiconductor quantum wells, Villa Conference on Energy, Materials, and Nanotechnology 2012, (April 16-20, 2012, Orlando, USA), A50. (Invited)
- ④山口明哲, 米岡賢, Nurassyakirin Bin Hasbi, 長谷川繁彦, GaN(0001)表面上へのCo薄膜の成長とその評価, 第60回応用物理学会春季学術講演会(2011.3.27-30, 神奈川工科大学), 29p-F1-14.
- ⑤M. Yoneoka, S. Hasegawa, H. Ichihara, A. Beppu, H. Yamaguchi, H. Asahi, Magnetic Properties of Iron Nitride Thin Films Grown on GaN(0001) Surfaces, The 15th SANKEN International Symposium 2012, The 10th SANKEN Nanotechnology Symposium (January 12th-13th, 2012, Osaka) P04.
- ⑥A. Beppu, S. Hasegawa, H. Ichihara, M. Yoneoka, H. Yamaguchi and H. Asahi, Growth of Co thin films on GaN(0001) and their magnetic properties, The 6th Int. Symposium on Surface Science (December 11-15, 2011, Tokyo) 14PN-53.
- ⑦H. Ichihara, S. Hasegawa, A. Beppu, M. Yoneoka, H. Yamaguchi and H. Asahi, Effects of the morphology of Fe thin films grown on GaN(0001) on their magnetic properties, The 6th Int. Symposium on Surface Science (December 11-15, 2011, Tokyo) 14PN-52.
- ⑧S. Hasegawa and H. Asahi, Growth and characterization of GaN-based dilute magnetic semiconductors, Asia-Pacific Workshop on Materials Characterization, Chennai, India, September 22-24, 2011. (Invited)
- ⑨S. Hasegawa, S. Komori, K. Higashi, D. Abe, Y.K. Zhou, and H. Asahi, Effect of growth conditions on magnetic and structural properties in Gd-doped GaN layers grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy, 9th International Conference on Nitride Semiconductors, Glasgow, UK, July 10-15, 2011, #E4.2.
- ⑩S. Hasegawa, Y.K. Zhou, S. Emura, and H. Asahi, Growth and characterization of GaN-based dilute magnetic semiconductors and their nanostructures, 2011 Villa Conference on Interactions Among Nanostructures (VCIAN), Red Rock Casino, Resort and Spa, Las Vegas, Nevada, USA, April 21-25, 2011. (Invited)
- ⑪米岡賢, 市原寛也, 別府亜由美, 山口明哲, 長谷川繁彦, 朝日一, GaN(0001)表面上への窒化鉄薄膜形成とその評価, 第59回応用物理学会関係連合講演会(2012.3.15-3.18, 早稲田大学), 17p-F2-14.
- ⑫米岡賢, 市原寛也, 別府亜由美, 山口明哲, 長谷川繁彦, 朝日一, GaN(0001)表面上の窒化鉄薄膜形成とその磁気特性, 第72回応用物理学会学術講演会(2011.8.29-9.2, 山形大学) 30p-P14-34.
- ⑬T. Furuya, M. Sotani, H. Ichihara, S. Hasegawa, H. Asahi, Magnetic properties of Fe/Fe oxide core-shell clusters formed on GaN(0001), 18th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM18), Atagawa, December 9-11, 2010, S4-63.
- ⑭S. Hasegawa, M. Kin, D. Abe, K. Higashi, Y.K. Zhou and H. Asahi, Magnetotransport properties in Gd-doped GaN grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy, International Workshop on Nitride semiconductors (IWN2010), Tampa, Florida, U. S. A., September 19 - 24, 2010.
- ⑮米岡賢, 古屋貴明, 市原寛也, 別府亜由美, 長谷川繁彦, 朝日一, GaN(0001)表面上の窒化鉄薄膜の形成と評価, 第58回応用物理学会関係連合講演会(2011.3.24-27, 神奈川工科大学) 25p-BC-3.
- ⑯市原寛也, 古屋貴明, 別府亜由美, 米岡賢, 長谷川繁彦, 朝日一, Feナノドットの磁気抵抗効果, 第30回表面科学学術講演会(2010.11.4-6, 大阪大学) 5P-073.
- ⑰古屋貴明, 市原寛也, 長谷川繁彦, 朝日一, GaN(0001)基板上に形成したFeクラスターの電流磁気効果, 第71回応用物理学会学術講演会(2010.9.14-17, 長崎大学) 14a-F-10.
- ⑱市原寛也, 曾谷基紀, 古屋貴明, 長谷川繁彦, 朝日一, 磁場印加中におけるFeナノドットのスピン偏極STM観察, 第57回応用物理学会関係連合講演会(2010.3.17-20, 東海大学) 18p-P8-3.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 繁彦 (HASEGAWA SHIGEHICO)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：50189528

### (2) 研究分担者

周 逸凱 (ZHOU YIKAI)  
大阪大学・産業科学研究所・助教  
研究者番号：60346179

朝日 一 (ASAHI HAJIME)  
大阪大学・産業科学研究所・特任教授  
研究者番号：90192947