

MnAs 薄膜の GaAs 基板へのホットウォールエピタキシー (HWE) 成長と磁気光学スペクトル

Magneto-Optical Spectra of MnAs on GaAs Grown by HWE

秋田正憲・池亀 弘*・中村知博・板橋淳一・佐藤勝昭

東京農工大学工学部, 東京都小金井市中町 2-24-16 (☎184)

*日本学術振興会特別研究員

M. Akita, H. Ikekame,* T. Nakamura, J. Itabashi, and K. Sato

Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei, Tokyo 184

*also Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

Ferromagnetic MnAs thin films were grown on GaAs (100) and (111)B substrates by the atomic-hydrogen-assisted hot-wall epitaxy technique, using polycrystalline powder of MnAs as evaporation source. The source and substrate temperatures were 700°C and 400°C, respectively. The surface orientations of the MnAs films grown on (100) GaAs substrates were (10 $\bar{1}$ 1) and (10 $\bar{1}$ 2), (111)B GaAs was (0001). The polar magneto-optical Kerr rotation and ellipticity spectra and reflectivity spectrum were measured in the films. The dielectric permeability spectra were calculated from experimental data, from which the magneto-optical spectra were analyzed.

Key words: MnAs, GaAs, atomic-hydrogen, hot-wall epitaxy, polar magneto-optical Kerr rotation, polar magneto-optical Kerr ellipticity, dielectric permeability

1. はじめに

近年, 新しい機能性デバイスへの観点から半導体-磁性体ハイブリッド構造の研究が注目を集めている. 特に, 半導体基板上に MnGa¹⁾, MnSb²⁾, MnAs³⁾ などの Mn 系金属間化合物の薄膜作製に関する研究が行われている. MnAs の単結晶についての光学的研究は多くない. これは, この物質が高温 ($T > 125^\circ\text{C}$) では常磁性六方晶 NiAs 構造をとり, 中間の温度 ($125^\circ\text{C} > T > 45^\circ\text{C}$) では常磁性の斜方晶 MnP 構造を, 低温 ($T < 45^\circ\text{C}$) では強磁性の六方晶 NiAs 構造をとることにより, 室温で強磁性の六方晶 NiAs 構造の MnAs を安定な状態で存在させることがむずかしいためであった^{4), 5)}. このため反射率についてのデータの報告はあるが⁶⁾, 磁気光学効果に関する報告例は極めて少なく⁷⁾, そのデータも狭い波長範囲 (500~900 nm) についてしか測定されていなかった. しかし, エピタキシャル技術の確立により, 半導体基板上に面方位を制御した MnAs 薄膜が作製できるようになった. 我々はホットウォールエピタキシー (HWE) を用いて半導体上に Mn 系金属間化合物を成長させ, 光学的评价を行い, MnSb に関してすでに報告している^{8), 9)}. また, MnAs についても薄膜作製および磁気光学スペクトルの測定に成功したので第 1 報として報告した⁹⁾.

本研究では, HWE により異なる面方位の GaAs 基板上に MnAs 薄膜を成長させ, 反射率および磁気光学スペクトルを測定し, 光学的解析を行ったので報告する.

2. 実験方法

結晶成長には, HWE 装置を用いた⁹⁾. 原子状水素 ($\text{H}\cdot$) は Al_2O_3 チューブ内の W フィラメント触媒を 1600°C に加熱し, 水素を流入することによって生成した. 基板は GaAs(100) および (111)B を用いた. 結晶成長の前処理として, 5×10^{-5} Torr の圧力で $\text{H}\cdot$ を照射しながら 430°C 15 分間加熱した. 原料には MnAs 多結晶粉末を用い, 原料温度 700°C , 基板温度は 400°C とし, 成長中にも 5×10^{-5} Torr の圧力で $\text{H}\cdot$ を照射している. 成長レートは 0.05 \AA/s で, 得られた試料の膜厚は 1000 \AA であった.

3. 結果および考察

3.1 成長方位

Fig. 1(a), (b) に GaAs(100), (111)B 基板に成長した MnAs の XRD パターンをそれぞれ示す. 基板からの回折線のほか, GaAs(100) には六方晶 NiAs 構造の MnAs 10.1 および 10.2 回折線が, GaAs(111)B には MnAs 00.2 とその高次の 00.4 回折線が確認され, 異相は全く同定されなかった. すなわち, GaAs (100) 基板上には MnAs(10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2) 面が, (111)B 基板上には (0001) 面が成長している. これは, 報告されている MBE 成長による試料の成長方位に一致している¹⁰⁾.

3.2 磁気光学特性

Fig. 2 に日立 U-3410 型分光光度計で測定した MnAs の反射率スペクトルを示す. 実線は MnAs(10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2) 面のスペクトルを表し, 破線は MnAs(0001) 面の場合に対応する. 両方のスペクトルについて 3 eV 付近に急峻な傾きが見られ, 鮮明な微細構造が現れていることを示唆している. また, 二つのスペクトルを比較すると, (10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2) 面の反射率が 3 eV 付近から滑らかに減少し, ほとんど変化しないのに対して, (0001) 面の減少の仕方はより急峻である. そして, 5 eV を境にして反射率スペクトルの大小関係が変化していることが確認できる.

Fig. 3 に, Fig. 2 の反射率スペクトルから Kramers-Kronig 変換して導出した誘電率テンソルの対角成分 ϵ_{xx} を示す. ϵ_{xx} の実数部 (ϵ'_{xx}) が 0 を横切る位置 (プラズマ周波数) は (10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2) 面では 3.2 eV 付近であるのに対し, (0001) 面では 3.5 eV 付近となりやや高エネルギー側にシフトしていることがわかる. 虚数部 (ϵ''_{xx}) のスペクトルについては, 方位による大きな

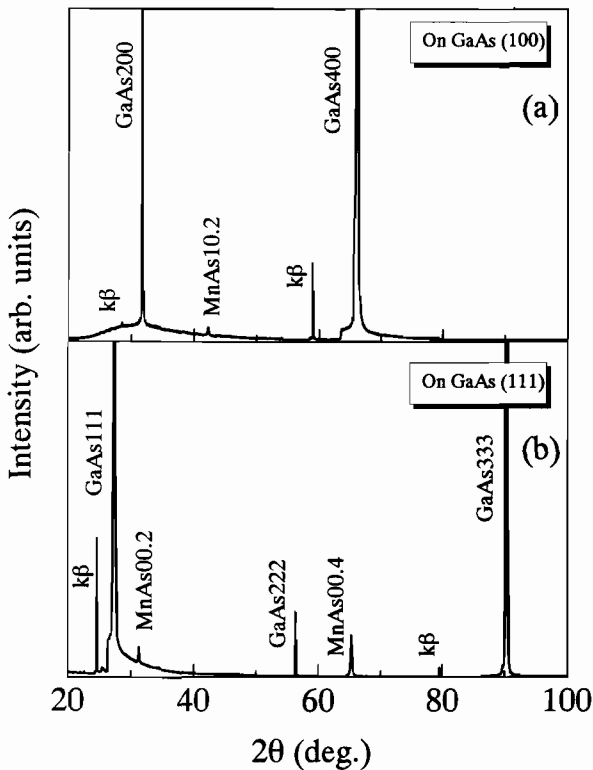


Fig. 1 XRD patterns of MnAs films grown on GaAs (a) (100) and (b) (111)B substrates.

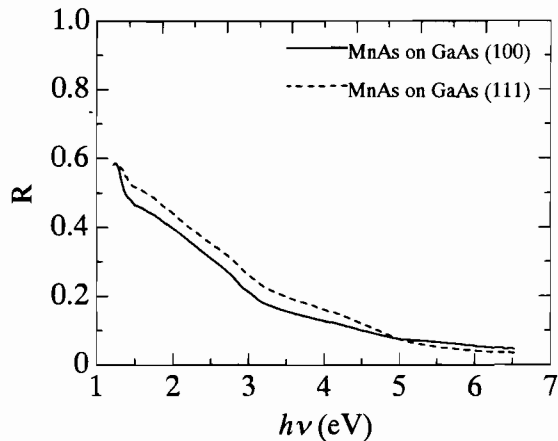


Fig. 2 Spectra of the optical reflectivity of (10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2) (solid line), and (0001) (broken line) surfaces of MnAs films.

違いは特に見られなかった。

MnAs 薄膜の磁気光学 Kerr スペクトルの測定は、1.2~6.4 eV の範囲で光弾性変調器 (PEM) を用いた円偏光変調法により行った。磁気光学 Kerr スペクトルの測定に先立って、Kerr ヒステリシスループを測定した。以前の報告によれば GaAs(100) 上に成長した MnAs は磁化容易軸を $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向に持ち、GaAs $\langle 001 \rangle$ 方向に 8 kOe の磁場をかけたときに磁氣的に飽和しないことが報告されている¹⁰⁾。GaAs(100) および (111)B 基板上に成長させた MnAs に対しそれぞれ、GaAs $\langle 001 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 方向に最大 1.7 T の磁場をかけ、測定を行ったが、いずれの方位の膜についても完全な磁気飽和は達成されなかった。そのため、磁気 Kerr 効果の絶対値についての議論には注意が必要で

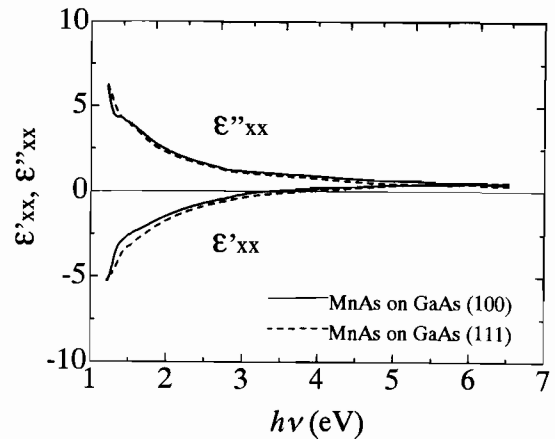


Fig. 3 Spectra of the real and imaginary parts of the diagonal dielectric permeability tensor element.

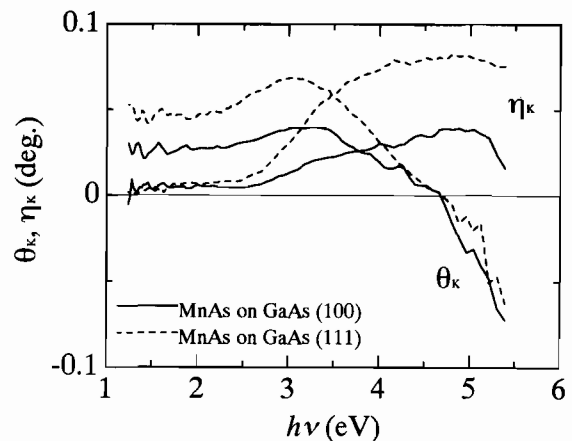


Fig. 4 Spectra of the Kerr rotation and Kerr ellipticity of (10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2) (solid line), and (0001) (broken line) surfaces of MnAs films.

ある。Fig. 4 に、印加した最大磁場 (1.7 T) における極 Kerr 回転角および楕円率スペクトルを示す。5.4 eV 以上においては、Fig. 2 に示すように反射率が 10% 以下と小さく信頼性のあるスペクトルが得られなかったので、Fig. 4 では 1.2~5.4 eV の範囲についてのみ示してある。スペクトルの形状に方位による依存性が見られた。いずれの試料も Kerr 回転角 θ_k は 3 eV 付近で最大値を示し、Kerr 楕円率 η_k が最大になる 4.8 eV 付近で 0 を通過した。

MnAs の磁気光学 Kerr 効果の起源を調べるために、磁気光学スペクトルと光学定数とから計算によって角周波数と導電率の非対角成分との積 $\omega\sigma_{xy}$ を導出した。このスペクトルを Fig. 5 に示す。絶対値の差異とともに、スペクトルの形状にも異方性が見られる。両方のスペクトルに共通して 4.8 eV 付近で虚数部が 0 を通過していることが確認できた。またいずれの膜においても虚数部 $\omega\sigma'_{xy}$ は 1.0~3.5 eV でほぼ平坦な一定値をとるが、これは、フェルミ面付近の電子状態がスピン偏極を受けていることを示唆している¹¹⁾。

4. まとめ

原子状水素援用 HWE により、半導体基板上に異相のない良質の MnAs 薄膜を成長させた。

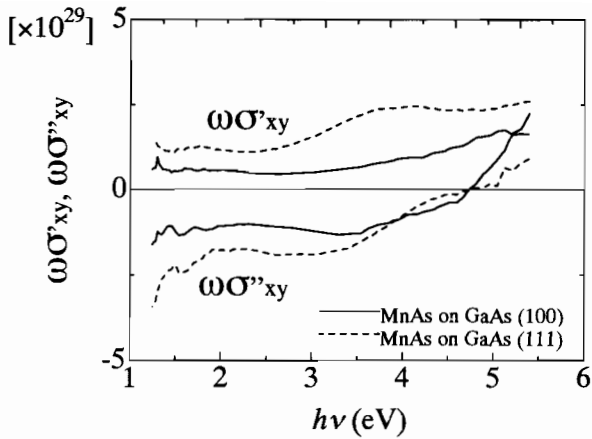


Fig. 5 Spectra of real and imaginary parts of the off-diagonal electric conductivity tensor element multiplied by the angular frequency.

XRDの結果により, GaAs(100)基板にはMnAs(10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2)が, (111)B基板にはMnAs(0001)が成長することが確認できた。

MnAs(10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 2)面とMnAs(0001)面の反射率および信頼性の高い磁気光学 Kerr スペクトルの報告を初めて行った。

反射率スペクトルと磁気光学スペクトルには明らかな面方位依存性が見られた。

今後, 電子構造との対応を検討する予定である。

謝 辞 エピレディ高品質 GaAs 基板は住友電気工業(株)より提供された。この研究の一部は文部省科学研究費補助金および(財)住友財団基礎科学研究助成により行われた。

文 献

- 1) M. Tanaka, J. P. Harbison, J. DeBoeck, T. Sands, B. Philips, T. L. Cheeks, and V. G. Keramidis: *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1565 (1993).
- 2) H. Akinaga, K. Tanaka, K. Ando, and T. Katayama: *J. Cryst. Growth*, **150**, 1144 (1995).
- 3) M. Tanaka, J. P. Harbison, T. Sands, T. L. Cheeks, V. G. Keramidis, and G. M. Rothberg: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **12**, 1091 (1994).
- 4) C. Guillaud and J. Wyart: *Ann. Phys.*, **4**, 689 (1948).
- 5) D. S. Rodbell and C. P. Bean: *J. Appl. Phys.*, **33**, 1037 (1962).
- 6) K. Bärner, R. Braunstein, and E. Chock: *Phys. Stat. Sol. (b)*, **80**, 451 (1977).
- 7) A. M. Stoffel and J. Schneider: *J. Appl. Phys.*, **41**, 1405 (1970).
- 8) H. Ikekame, Y. Morishita, and K. Sato: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**, 181 (1996).
- 9) H. Ikekame, Y. Yanase, M. Akita, Y. Morishita, and K. Sato: Proc. Magneto-Optical Recording Int. Symp. '96, Noordwijkerhout, 1996, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**(Suppl. S1), 153 (1996).
- 10) M. Tanaka, J. P. Harbison, M. C. Park, Y. S. Park, T. Shin, and G. M. Rothberg: *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1964 (1994).
- 11) J. L. Erskine and E. A. Stern: *Phys. Rev. B*, **8**, 1239 (1973).

1996年10月15日受理, 1996年12月3日採録