

化合物半導体薄膜ホー儿素子の開発

柴 崎 一 郎



化合物半導体薄膜ホール素子の開発

柴 崎 一 郎

高感度 InSb 薄膜ホール素子は VTR のテープ走行の制御や、フロッピーディスク、CD-ROM などを駆動する小型精密制御のブラシレスモーターの重要な無接触磁気センサーとして市場が急速に伸びている。InSb に次いで高い電子移動度を有する InAs 薄膜の製作に MBE 法を応用した、きびしい環境下での駆動が可能な高感度、高性能の InAs ホール素子が開発され実用化が始まった。さらに、InAs の量子井戸構造の高感度ホール素子の開発も進んでいる。いまや、ホール素子は化合物半導体の重要な応用分野となりつつある。

Keywords : magnetic sensor, InSb Hall element, InSb thin film, InAs Hall element, InAs MBE, InAs deep quantum well, InAs quantum well, InAs thin film, InAs quantum well Hall element

1. ま え が き

ホール素子は、半導体のホール効果を利用して磁界を検出して電圧信号(ホール出力電圧 V_H)として出力する磁気センサーである。InSb, InAs, GaAs などの電子移動度が大きい化合物半導体が使われ、薄膜化により大きなホール出力電圧が得られる¹⁻⁴⁾。現在は、InSb ホール素子が最も多く生産され市場の 80% を占める。次に多いのは GaAs ホール素子で、市場の 20% 弱を占めると推定される。ホール素子の用途の 90% 以上は、オーディオ、ビデオ、パーソナルコンピューターなどの駆動に使われる小型で精密制御、ローノイズが要求される DC ブラシレスモーター(ホール素子を使うのでホールモーターともいう)の磁気センサーである。最近の増加するホール素子の市場を図 1 に示した。1997 年の生産は 12 億個を超えると推定され、ホール素子は発光素子や高周波デバイスと並んで重要な化合物半導体の応用分野となりつつある⁵⁻⁹⁾。

現在のホール素子の応用はブラシレスモーター(ホールモーター)分野が主であるが、最近、直流電流の無接触検出や、自動車用の無接触回転検出、さらに産業用機械の制御用の無接触の位置検出センサーなどの新たなホール素子の応用が注目されている。

これらの用途は、屋外や高温度、低温度などのきびしい環境条件下での駆動が特徴で、高い信頼性、長寿命、広い温度範囲にわたる安定動作などが要求され、InSb ホール素子を用いることは大変難しい。理由は、InSb の性質からくる $-2.0\%/^{\circ}\text{C}$ の大きな抵抗値変化である。また、市販されている GaAs ホール素子も、磁界での感度が低く問題となっている。このような既存のホール素子の問題点を解決した InAs 系ホール素子が MBE 法により開発され実用化が始まっている。

以下、実際に使われている InSb, InAs 系ホール素子技術を中心に現状をまとめた。2. では、著者らが開発し、市場で最も多く使われている(市場占有率 70%, 最近の生産量は年間 8 億個を超える)高感度 InSb 薄膜ホール素子について紹介する。3. では、最近開発した分子線エピタキシー(MBE)法による Si ドープ InAs 薄膜ホール素子、4. では次世代素子技術として期待される InAs 深い量子井戸構造のホール素子について研究の現状を述べる。

2. 高感度 InSb 薄膜ホール素子

ホール素子は、当初 InSb の単結晶を研磨して製作され、入力抵抗が一般に数オームと小さく、定電流で駆動するためホール電圧の温度変化($-2\%/^{\circ}\text{C}$)が大きく使いにくかった。さらに量産も難しく高価な磁気センサーであった²⁻⁴⁾。

現在市場で大量に使用されている高感度 InSb ホール素

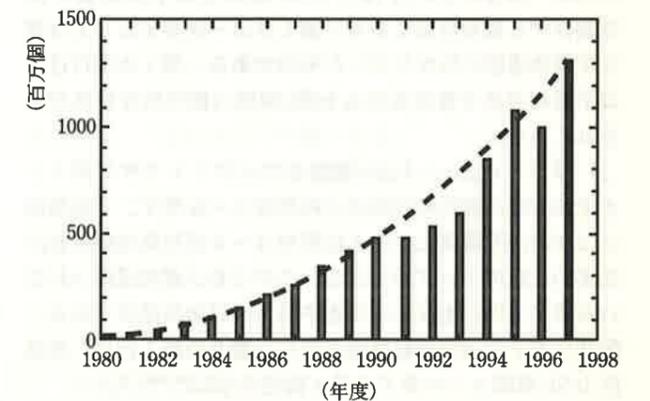


図 1 ホール素子の市場の成長(世界)。

旭化成工業株式会社研究開発本部(富士) 〒416-8501 富士市鮫島 2-1.
Practical Hall elements by thin film technology. Ichiro SHIBASAKI. Corporate Research & Development Administration (Fuji) Asahi Chemical Industry Co., LTD. (2-1, Samejima, Fuji 416-8501)

分類番号 3.2, 3.7

表1 InSb, InAs薄膜, およびInAs深い量子井戸(DQW)構造の特性.

	Dopant	Electron mobility μ_n (cm ² /V·s)	Electron density n ($\times 10^{16}$ cm ⁻³)	Thickness d (μ m)
InSb	None	20000~30000	2	0.8
InAs	Si	11000	8	0.5
DQW	None	20000~32000	50	0.015

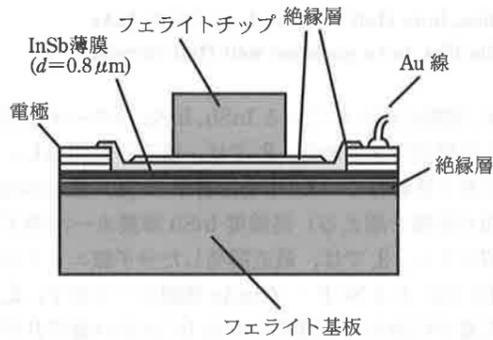


図2 高感度 InSb ホール素子の構造 (断面).

子は, センサー部に真空中で薄いマイカ基板上に蒸着された InSb 多結晶薄膜を使う. センサー部に蒸着薄膜を使うことで特徴あるメリット, 量産性, 高感度, よい温度特性が得られる.

この技術は, 以下の3点に要約される^{10~13)}.

1) InSb 薄膜の真空蒸着法をベースとした工業的な量産製造技術. すなわち, 薄いマイカ基板上に電子移動度 20,000~30,000 cm²/V·s の InSb 薄膜を真空蒸着法により製作する量産技術である. 表1はホール素子として好適な半導体薄膜の特性を示したものである. 表1の1行目には上述の方法で量産される InSb 薄膜の標準的な特性が示されている.

2) 厚さ 0.8 μm の InSb 薄膜をフェライトでサンドイッチする新規な磁気増幅構造の高感度ホール素子. この構造により, InSb 薄膜に加わる磁界が3~6倍程度増幅され, 効率的に感度アップができる. このため, 現在量産されている素子では, 当該ホール素子がトップの高感度である. 図2に素子の磁気増幅構造を示し, 表2の第1行に, 高感度 InSb 薄膜ホール素子の基本特性を示した^{7,10,11)}.

3) 新規の定電圧駆動による室温周辺での温度依存性の低減. 真空蒸着による高感度 InSb 薄膜ホール素子は, 単結晶と比較して電子移動度が小さく, かつ薄膜をセンサー部に用いるので入力抵抗が 350 Ω と大きく, 定電圧, すなわち 1 V の入力電圧で駆動でき, ホール出力電圧の室温周辺で

表2 高感度薄膜 (InSb, InAs, InAs DQW) ホール素子の特性.

	Driving voltage V_{in} (V)	Hall output voltage V_H (mV) ($B=0.05$ T)	Offset voltage V_o (mV) ($B=0$ T)	Resistance R_{in} (Ω)
InSb	1	150~320	< ± 7	240~550
InAs	6	100	< ± 16	400
DQW	6	250~300	< ± 16	700

の温度依存性が従来の値の 1/10~1/20 に小さくなった.

これは, 電子移動度の温度依存性がホール電圧の温度依存性を決める定電圧駆動の大きな特徴で^{10,11)}, InSb の真空蒸着薄膜をセンサー部に採用したメリットである. InSb ホール素子ではこの効果は特に顕著である.

この素子は, 小型モーターの磁気センサーに使える小型の樹脂パッケージに納められ, 大量生産され, 低価格を実現した. かつ, その特性は磁気増幅構造により, これまでの常識を破る高感度, 低消費電力, および高信頼性を有する. この結果, 小型で制御精度のよい, かつノイズの少ない高性能のブラシレスモーターにいまや大量に使われている. この素子の出現により, 小型で, 低価格, 量産性のよいブラシレスモーターの生産, 供給が初めて可能になった. 以来, 高感度ホール素子を使ったブラシレスモーターは, オーディオ, ビデオ機器の駆動源やパーソナルコンピュータの記憶装置の駆動源などに多用されており, 情報化社会を支えるハードシステムの重要部品として新たなモーター産業の一翼を担っている^{5~9)}.

3. MBE 法による Si ドープ InAs 薄膜ホール素子

ホール素子の将来の用途として期待される自動車用などの無接触センサーでは, -40~150 °C の範囲で安定して動作することが要求される. これまでの用途では, 室温周辺約 100 °C, すなわち -20~80 °C 程度の範囲で駆動できればよかったが, 新たな応用では駆動温度範囲は実質 2 倍の 200 °C に拡大する. InSb は温度上昇とともに抵抗値が急激に低下する性質があり, 100 °C を超える高温では InSb ホール素子の動作は大きな制限を受ける.

InAs は, InSb に次ぐ高い電子移動度を有し, バンドギャップも InSb より大きく, 高感度でしかも低温から高温まで安定して働くホール素子が期待できる^{14~18)}.

InAs は, 室温でのエネルギーギャップ ΔE_g が 0.36 eV (300 K), 格子定数は 6.06 Å, 電子移動度は 33,000 cm²/V·s, $d(\Delta E_g)/dT$ が 0.35×10^{-4} eV/K である. 室温周辺ではエネルギーギャップの温度依存性は少ない.

適当な条件下で GaAs の表面に直接 MBE 法により成長

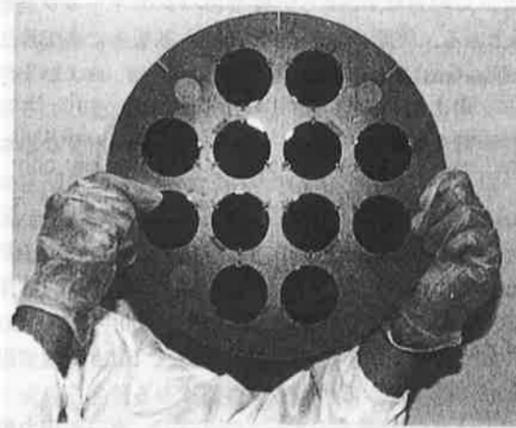


図3 12枚の GaAs 基板上に成長した InAs 薄膜 (大面積 MBE).

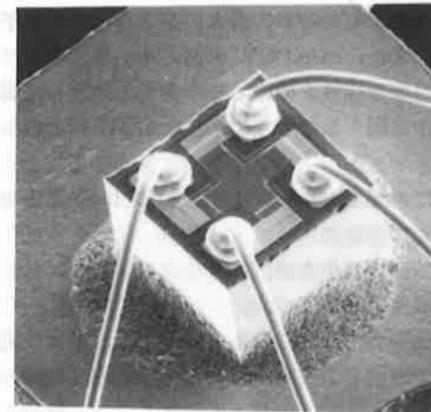


図4 InAs ホール素子チップ (写真).

したアンドープの InAs は n 型で, 室温 (25 °C) の電子移動度は, 膜厚 1.2 μm で 9,000 cm²/V·s 程度である. InAs の単結晶薄膜を結晶成長させる基板として半絶縁性の GaAs (100) 表面より 2° off した面を用いた^{18~20)}. GaAs 基板とは 7% というかなり大きな格子のミスマッチがあるがあえて無視した.

アンドープの InAs 薄膜の電子移動度の温度依存性は, InSb に比べて小さいが 150 °C まで使用するホール素子を製作するためには十分小さいとはいいたい. この解決には InAs 中に不純物のドーピングが有効である^{15,16)}.

MBE 法で成長した InAs 薄膜ではドーピングして電子濃度を大きくすることにより, 電子濃度の温度係数と電子移動度の温度係数を同時に小さくできる^{16~19,21)}. n 型不純物としては Si を用い, InAs の結晶成長中にドーピングした. 膜厚 0.5 μm で Si をドーピングした InAs 薄膜は, 室温

InAs Hall Elements

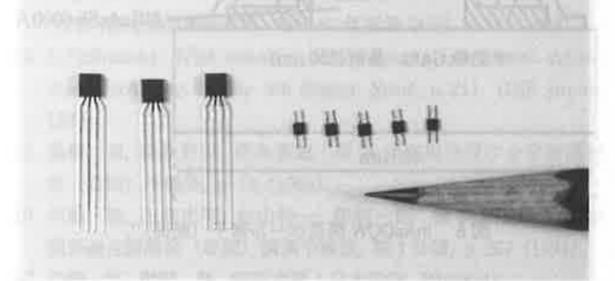


図5 InAs ホール素子 (写真).

での電子移動度が 10,000 cm²/V·s を超える. さらに, 抵抗値 (シート抵抗値) と電子移動度の温度依存性は, Si のドーピングの効果でアンドープの場合に比べて小さくなり, ホール素子製作に好適である.

次に, ホール素子を量産の目的での大面積の InAs 薄膜が成長できる MBE システムを開発した^{7,21,22)}.

この MBE 装置は 1 枚の基板ホルダーに 2 インチ GaAs 基板が 12 枚同時にセットでき, Si をドーピングした InAs の薄膜が 12 枚同時に成長できる. (図3写真参照)

この MBE 装置により, GaAs 基板上に成長した厚さ 0.5 μm, Si ドープ InAs 薄膜の特性を表1の第2行に示した.

量産薄膜の標準的な特性は電子濃度 8×10^{16} /cm³, 電子移動度は 11,000 cm²/V·s である. 製作したホール素子は, 感磁部が十字の対称パターンで, 入力抵抗, 出力抵抗を 350 Ω, チップサイズは 0.36 mm² とし, 本素子特有のウエハープロセスにより素子化し, 量産ラインでパッケージし製作した (図4, 図5の写真参照)^{7,17,18)}.

Si ドープの InAs ホール素子の特性は, 表2の第2行に示したが, 下記のような特徴がある.

- 1) 磁界での出力の直線性に優れる.
- 2) 磁界での感度も市販の GaAs ホール素子よりも 50% 程度高く, ホール素子の感度 (ホール出力電圧) 100 mV / 6 V · 0.5 T が量産素子で得られている.
- 3) ホール出力電圧の温度依存性は -0.18% / °C で, きわめて小さい. 適当な駆動条件を選ぶことで -40~150 °C の広い温度範囲で駆動できる.

さらに, ノイズやオフセット電圧のドリフトが少ないなど使用上の特徴も多い^{17,18,21,22)}.

このような特徴を有する MBE 法で初めて量産された Si ドープ InAs 薄膜ホール素子は, 直流や過渡的な電流を無接触で検出できる電流センサーの磁気センサーとして使

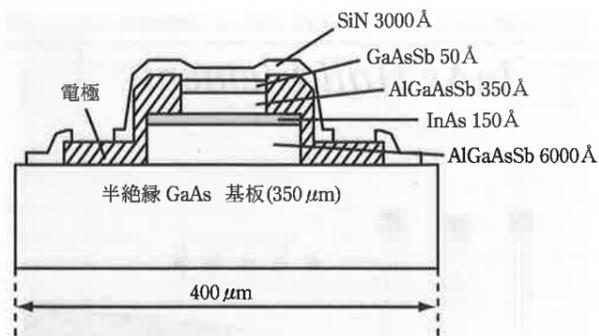


図6 InAsDQW 構造ホール素子 (断面)⁷⁾

討した。この系はInAsと伝導帯のバンドギャップ差が1 eV以上ある。実際には、GaAs(100)基板上にMBE法により $Al_{0.65}Ga_{0.35}As_{0.02}Sb_{0.98}$ 層をバッファ層、および上部のキャップ層に用い厚さ150 ÅのInAsを動作層とする深い量子井戸構造(Deep quantum well: DQW)、すなわち、GaAsSb(5 nm)/AlGaAsSb(35 nm)/InAs(15 nm)/AlGaAsSb/GaAs(substrate)を成長しホール素子を製作した^{7,24~26)}。図6には、深い量子井戸構造のホール素子断面を示した⁷⁾。表1の第3行にその特性を示した^{27,28)}。動作層のInAsの室温の電子移動度として20,000~32,000 cm²/V・sの値が得られた。この値は、これまでInAs薄膜で得られた電子移動度としては最も高い値である。

このInAsDQW構造のホール素子では、ホール出力電圧がSiドープInAsホール素子の2.6倍の260 mV/6 V・0.05 Tの高感度、高出力が得られた。ホール出力電圧と検出磁界との比例性にも優れ、さらにホール出力電圧の温度依存性もきわめて少ない。表2の第3行に試作素子の特性を示した。また、InAsDQW構造のホール素子のホール出力電圧の温度依存性を他のホール素子と比較して図7に示した。図から明らかなように、InAsDQW構造のホール素子は、

- 1) 磁界での感度(ホール出力電圧)がInSbホール素子並に高い。
- 2) 温度依存性は小さい。
- 3) 動作温度範囲が広い。

という特徴を有する。このホール素子は、量産技術の確立など今後の課題もあるが、新たなより広範な将来の非接触、

われ好評である²³⁾。自動車用途の磁気センサーとしても応用が検討されている。不満があるとすれば、磁界での感度がInSbホール素子に及ばないことである。この解決は次章で述べる。

4. InAsの深い量子井戸(DQW)構造ホール素子

InAsホール素子の温度依存性を少なく、かつ磁界での感度もしくは出力を大きく得るには、センサー部のInAs薄膜に対して、高い電子移動度と高い電子濃度、さらに、高いシート抵抗値が要求される。この矛盾した要求を満たすにはセンサー部のInAs薄膜をきわめて薄くする必要がある。このような条件を実現するためにはInAsと格子整合のよい絶縁層が必要となる。InAsと格子整合する $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ ($0 \leq x \leq 1.0, 0 \leq y \leq 1.0$) からなる4元系をポテンシャルバリア層とした量子井戸構造の製作を検

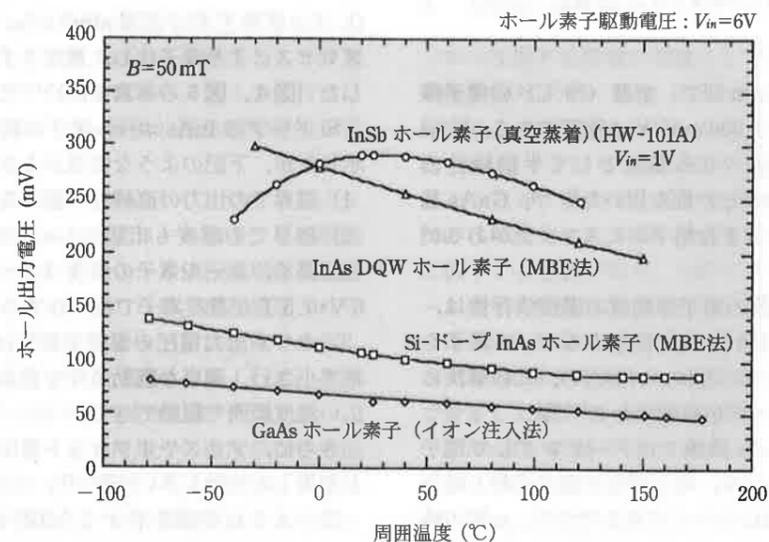


図7 各種ホール素子のホール出力電圧の温度依存性。

無接点センサーのニーズに対応できる次世代磁気センサーとして期待できる。

5. む す び

本稿は著者の独断で、実用化されている研究を中心にホール素子技術を述べさせていただいた。

ホール効果、ホール素子の研究は、米、欧に始まったが実用化につながる先駆的な基礎研究が日本で行われた。東京工業大学の酒井善雄教授(当時)のグループは早くからInSbの蒸着法による研究を行い、また電気試験所(現電子技術総合研究所)の片岡照栄氏(当時)は磁電変換素子研究の成果を名著『磁電変換素子』として著している。これらの先駆的研究は、日本におけるその後の磁気センサーの実用技術発展の基礎となったことを特記したい^{2,4)}。

いまや、ホール素子は年間10億個以上生産される化合物半導体磁気センサーとして成長し、InSbやInAsのような高い電子移動度を有する化合物半導体薄膜の重要な応用分野となりつつある。

ホール素子を用いた小型ブラシレスモーターは、動力を生む手段として半導体とともに、21世紀に向けて情報電子産業を支える重要部品である。それを可能とするホール素子もまた重要部品である。ホール素子は、さらに無接触の磁気センサーとしての特徴を生かし、無接触電流検出、各種の無接触スイッチや自動車用の無接触センサーへの応用など、21世紀へ向けた新たな発展が期待されている。

謝 辞

本稿の執筆を薦めていただいた東京工業大学小長井誠教授にはご支援ご協力を賜り深く感謝します。

さらに、著者がホール素子の研究をスタートして以来、本研究と一緒に進め、またご支援、ご協力をいただいた旭化成工業(株)、および旭化成電子(株)の先輩、同僚、後輩の方々には心から謝意を表したい。

文 献

- 1) E. H. Hall: Am. J. Math. 2, 287 (1879).
- 2) 片岡照栄: 磁電変換素子(日刊工業新聞社, 1972).
- 3) H. Weiss: 磁電変換素子の構造と応用, 片岡昭栄訳(コロナ社, 1974).
- 4) 酒井善雄, 大下正秀: 電気学会雑誌 80, 166 (1960).
- 5) 柴崎一郎: 化学と工業 49, 7 (1996).
- 6) I. Shibusaki: IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1995 Annual Meet. Vol. 1, San Francisco, p. 85. (IEEE, 1995).
- 7) I. Shibusaki: J. Cryst. Growth, 175/176, 13 (1997).
- 8) Compound Semiconductors, September/October, p. 38 (1996).
- 9) N. Kuze and I. Shibusaki: III-V review 10, No. 1, 28 (1997).
- 10) 柴崎一郎: 蒸着ホール素子とその特性(半導体の先端技術集成

p. 373 ((株)経営システム研究所, 1984).

- 11) 柴崎一郎: 日化協月報, 高感度ホール素子とその実用化, 41, No. 5 12 (1988).
- 12) 高感度InSbホール素子の開発と量産化 大河内賞受賞業績報告書, 昭和62年度第34回, p. 58 (1988).
- 13) I. Shibusaki: High sensitive Hall element by vacuum deposition, Tech. Dig. of the 8th Sensor Symp. p. 211, (IEE Japan, 1989).
- 14) 高橋 清, 森泉豊栄, 酒井善雄: 第26回応用物理学会学術講演会(春期)予稿集, p. 18 (1965).
- 15) 伊藤 隆, 市森史明, 金山裕一, 柴崎一郎: 第38回応用物理学会関係連合講演会(春期)講演予稿集, 第1分冊, p. 267 (1991).
- 16) 柴崎一郎, 榎野 隆, 田近克彦: 日本特許, P1598818.
- 17) I. Shibusaki, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Ito, F. Ichimori, T. Yoshida and K. Harada: Tech. Dig. of the 10th Sensor Symp. p. 113 (IEE Japan, 1991).
- 18) I. Shibusaki, Y. Kanayama, T. Ito, F. Ichimori, K. Nagase, T. Yoshida and K. Harada: High sensitive thin film InAs Hall elements by MBE, Digest of Technical Papers, Transducers p. 1069, (IEEE, 1991).
- 19) I. Shibusaki: Proc. of the 4th International conf. on micro machine and human science, Nagoya, p. 165, (Economic Affairs Bureau, City of Nagoya, 1993).
- 20) M. Yamamoto, T. Iwabuchi, T. Ito, T. Yoshida, T. Isoya and I. Shibusaki: J. Cryst. Growth, 175/176, 191 (1997).
- 21) T. Yamamoto, T. Iwabuchi, T. Ito, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Yoshida and F. Ichimori: Tech. dig. of the 12th Sensor Symp. p. 221 (IEE Japan, 1994).
- 22) T. Iwabuchi, T. Ito, M. Yamamoto, K. Sako, Y. Kanayama, K. Nagase, T. Yoshida, F. Ichimori and I. Shibusaki: J. Cryst. Growth 150, 1302 (1995).
- 23) 伊藤 隆, 山本正樹, 市森文明, 吉田孝志, 名井一展, 柴崎一郎: 電気学会, 東京支部沼津・山梨支所第3回研究発表会予稿集, p. 13 (1996).
- 24) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, T. Iwabuchi, A. Ichi, M. Toyama and I. Shibusaki: Digest of Technical Papers (Late News), The 7th International Conf. on Sensors and Actuators: Transducers, '93, p. 32 (IEE, Tokyo, Japan, 1993).
- 25) K. Nagase, S. Muramatsu, N. Kuze, A. Ichi, I. Shibusaki and K. Mori: Tech. dig. of the 12th Sensor Symp. p. 209 (IEE, Tokyo, Japan, 1994).
- 26) N. Kuze, K. Nagase, S. Muramatsu, S. Miya, T. Iwabuchi, A. Ichii and I. Shibusaki: J. Cryst. Growth 150, 1357 (1995).
- 27) S. Miya, S. Muramatsu, N. Kuze, K. Nagase, T. Iwabuchi, A. Ichii, M. Ozaki and I. Shibusaki: J. Electron. Mater. 25, 415 (1996).
- 28) N. Kuze, H. Goto, M. Matsui, I. Shibusaki and H. Sakaki: J. Cryst. Growth 175/176, 868 (1997).

(1997年11月17日 受理)