

論文 InAlAs/歪 InGaAs HEMT

変調ドープ層の超格子化によるキャリア濃度低下抑制 *

InAlAs/Pseudomorphic InGaAs/InP High Electron Mobility Transistor with Doped InAs/AlAs Superlattice

小原輝昭

Teruaki KOHARA

星野浩一

Koichi HOSHINO

田口隆志

Takashi TAGUCHI

We have demonstrated a novel indium phosphide high electron mobility transistor (HEMT) which has prevented sheet carrier density degradation. The fabricated structure replaces n-In_{0.52}Al_{0.48}As with an n-InAs/n-AlAs superlattice (doped InAs/AlAs superlattice; DIAS), preventing carrier density degradation of the n-type doped carrier supply layer on HEMT. DIAS requires a two-dimensionally grown seven-period superlattice each period of which has two monolayers of InAs and two monolayers of AlAs. The fabricated HEMT exhibits improved prevention of sheet carrier density degradation compared with the conventional HEMT with an n-In_{0.52}Al_{0.48}As carrier supply layer in the case of 300-450 °C annealing and a 125 °C bias temperature (BT) test.

Key Words : Doped InAs/AlAs Superlattice(DIAS), High Electron Mobility Transistor(HEMT), Reliability, Carrier Density Degradation, Two-dimensionally Grown Superlattice

1. 序論

近年、InGaAsの優れた電気特性が注目され、InP基板上のInAlAs / InGaAs HEMT (high electron mobility transistor) の高周波デバイスへの適用例が、何件か報告されている¹⁾³⁾。これらのInAlAs / InGaAs HEMTは、キャリアを供給する変調ドープ層にn型InAlAsを用い、キャリアが走行するチャンネル層にアンドープInGaAsを用いることにより優れた高周波特性を実現している。中でも、InP基板との格子定数の差が臨界面厚以内に制限され、In組成比xが0.53より大きいIn_xGa_{1-x}Asチャンネル層は、電子有効質量 m^* が極めて小さく、かつ、伝導帯エネルギー不連続 E_c が大きいため、高周波特性をさらに向上することが期待できる。この点に注目し、我々はIn_{0.8}Ga_{0.2}Asを用いたInAlAs / 歪In_{0.8}Ga_{0.2}As HEMT構造において、室温(300K)で電子移動度 μ が14,000cm² / Vs、シートキャリア濃度 n_s が 3×10^{12} cm⁻²という高い値を得た⁴⁾。さらに我々は、InAlAs / 歪In_{0.8}Ga_{0.2}As HEMT構造の信頼性を調べるために、ホール効果測定用パターンを用いて、 μ および n_s の変化を80%、電流5mA、2,200時間の高温連続通電試験により評価した。その結果、 μ は14,000cm² / Vsで変化がなかったものの、 n_s は試験開始前の 1.5×10^{12} cm⁻²から 1.2×10^{12} cm⁻²に減少した⁵⁾。

InAlAsの n_s 低下現象に関し、早藤らの報告がある⁶⁾。

* 物理系学術誌刊行協会の了解を得て、Japanese Journal Applied Physics (JJAP) 誌(2000.4)より和訳し、一部加筆して転載

早藤らは、InP基板上に形成したn型In_{0.52}Al_{0.48}Asに350-450 °Cの熱処理を行い、熱処理後にキャリア濃度が減少することを見出した。また2次イオン質量分析(SIMS)により、キャリア濃度が減少したn型In_{0.52}Al_{0.48}Asにおいて、フッ素F濃度の増加が見られることも同時に報告している。以上の結果を基に早藤らは、熱処理によりn型In_{0.52}Al_{0.48}As層内に拡散したFが、n型In_{0.52}Al_{0.48}Asのキャリア濃度低下を引き起こしたと結論した。しかし、n型In_{0.52}Al_{0.48}As層内に拡散したFの拡散源や、キャリア濃度低下のメカニズムについては、いまだ明らかにされていない。

早藤らの実験結果を考慮すると、我々が確認したInAlAs / 歪In_{0.8}Ga_{0.2}As HEMTの高温連続通電試験における n_s の低下は、F混入に起因するn型In_{0.52}Al_{0.48}As変調ドープ層のキャリア濃度低下によりもたらされたと考えられる。

このn型In_{0.52}Al_{0.48}Asのキャリア濃度低下を抑制するために富士原らは、n型In_{0.52}Al_{0.48}As変調ドープ層直上に、ノンドープInAsとノンドープAlAsを数分子層の厚さで繰り返した超格子を挿入したHEMTを提案し、SPRINT (superlattice inserted transistor) と命名した⁷⁾。SPRINTは、ノンドープのInAs / AlAsがキャリア濃度低下原因と考えられるFを吸収し、n型In_{0.52}Al_{0.48}AsへのF拡散を妨げるため、キャリア濃度低下の抑制に

効果があるとした．しかしSPRINTでは，n型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ へのFの拡散量が，ノンドープInAs/AIAs超格子が吸収できる許容量を超えたときに，キャリア濃度低下が生じる可能性を否めない．

そこで我々は，キャリア濃度低下の可能性が残るn型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 変調ドープ層を含まない，新しいInP系HEMTを提案した．新型InP系HEMTは，変調ドープ層にn型InAs/n型AIAs超格子を用いており，この超格子をDIAS(doped InAs/AIAs superlattice)と命名した．

2. DIAS-HEMT 構造

我々は，シリコンドープされたn型InAsと，同じくシリコンドープされたn型AIAsは，350 °Cの熱処理後でも，キャリア濃度低下は3%にまで抑制できることをホール測定により確認した⁵⁾．この結果は，n型InAsもしくはn型AIAsをHEMTの変調ドープ層に用いることにより，キャリア濃度低下を抑制できる可能性を示唆している．しかし，InP基板に対しInAsは+3%の格子不整合を有し，またAIAsは-3%の格子不整合を有する．よってInP基板上にInAsもしくはAIAsをエピタキシャル成長する場合，格子不整合に起因する格子欠陥が問題となる．それに対し我々は，キャリア濃度低下の抑制と格子欠陥の防止を両立する構造として，n型InAsとn型AIAsを同じ膜厚ずつ繰り返し形成した超格子を持つDIAS-HEMTを提案した．

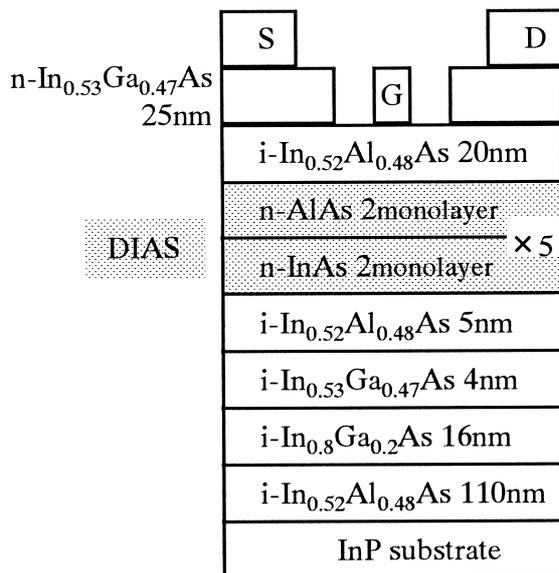


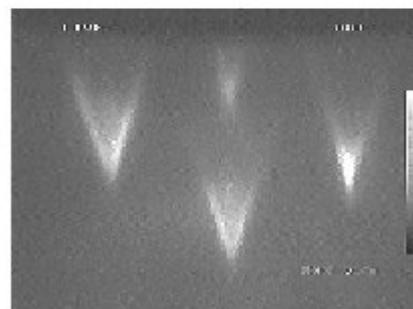
Fig. 1 Cross-sectional diagram of InAlAs/pseudomorphic InGaAs/InP with DIAS

Fig.1にDIAS-HEMTの断面構造を示す．Peopleらの理論計算を適用すれば⁸⁾，InP基板に対し±3%の格子不整合を有するInAsとAIAsを，格子欠陥を生ずること無く形成できる臨界膜厚は各々4分子層以内である．したがって，DIASを構成するInAsとAIAsの1層あたりの膜厚を4分子層以内とし，分子線結晶成長装置(MBE)によるエピタキシャル成長条件を検討した．

Fig.2は，DIASをMBEによりエピタキシャル成長した際の，基板表面の高エネルギー反射電子回折(RHEED)パターンである．InAsとAIAsの各膜厚が2分子層の場合[Fig.2(a)]，InAs/AIAs超格子からのRHEEDパターンはstreakyなパターンを示し，平坦な結晶表面が得られる2次元成長を示唆している．一方，InAsとAIAsの各膜厚が3分子層の場合[Fig.2(b)]，RHEEDパターンはarrow型のパターンを示し，表面の凹凸を伴う3次元成長を示唆している．InAsとAIAsの各膜厚が4分子層の場合も，3分子層の場合と同様に3次元成長のRHEEDパターンが観察された．このような，格子不整合系における3次元成長は，転位および格子欠陥の発生原因となり得る．



(a)



(b)

Fig. 2 RHEED patterns during DIAS growth
(a) DIAS with two monolayers per period
(b) DIAS with three monolayers per period

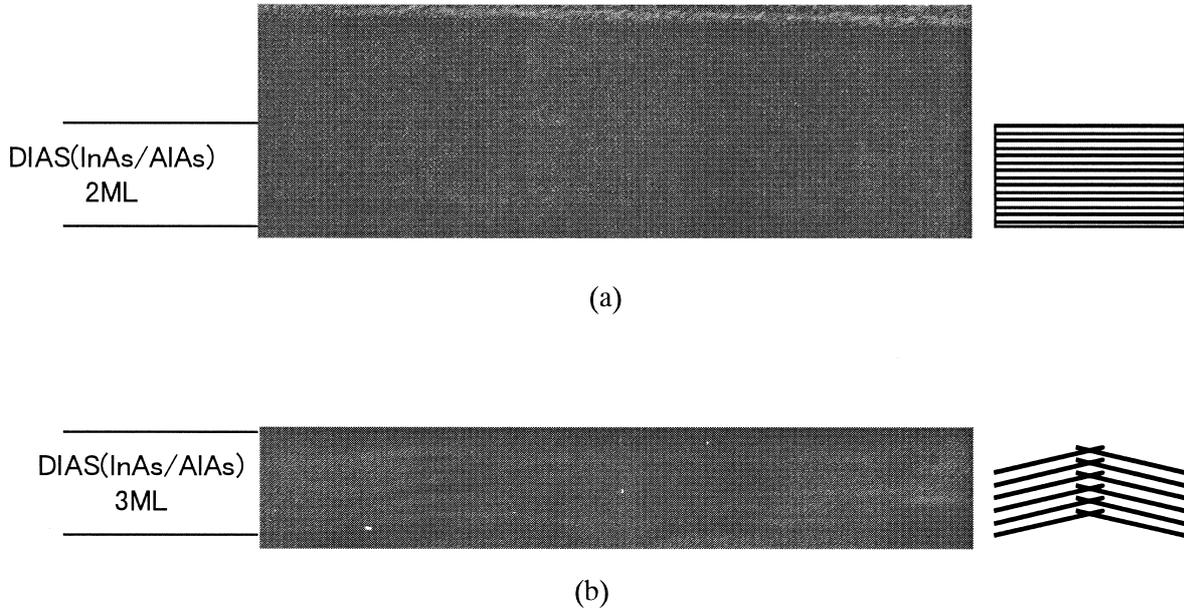


Fig. 3 Cross-sectional TEM observation of DIAS
 (a) DIAS with two monolayers per period
 (b) DIAS with three monolayers per period

またFig.3は、DIAS-HEMTの膜構造を透過電子顕微鏡観察(TEM)した像である。TEM観察の結果からも、RHEEDの結果を裏付ける結果が得られた。InAsとAlAsの各膜厚が2分子層の場合[Fig.3(a)],平坦な成長面が観察され2次元成長であることが分かる。一方、InAsとAlAsの各膜厚が3分子層の場合[Fig.3(b)],成長面の凹凸が観察され3次元成長であることが分かる。

Fig.4は、DIAS-HEMTの膜構造をホール測定した結果である。InAsとAlAsの各膜厚が2分子層のDIAS-HEMT構造の電子移動度 μ は、室温で $11,200\text{cm}^2/\text{Vs}$ を記録した。一方、InAsとAlAsの各膜厚が3分子層以上のDIAS-HEMT構造の μ は、室温で $10,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ であった。 μ の $11,200\text{cm}^2/\text{Vs}$ から $10,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ への低下は、DIASの3次元成長に起因する可能性が否定できない。

以上、Fig.2-4の結果は、DIAS-HEMTにおいて結晶欠陥による電気特性の低下を伴わないn型InAsとn型AlAsの各膜厚は、2分子層以下であることを示している。

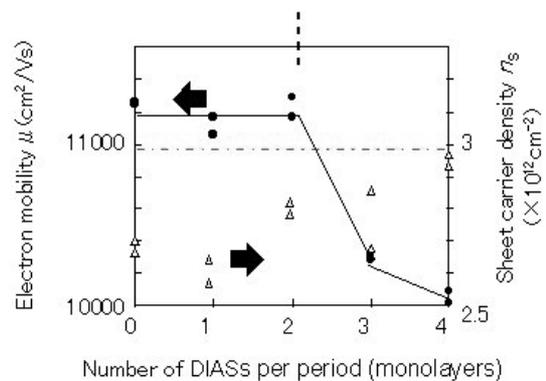


Fig. 4. Hall measurement results for DIASs of various one-period thicknesses

3. 実験方法

DIAS-HEMT構造は、MBE(VG V90型)によるエピタキシャル成長で形成した(Fig.1)。Feドープ半絶縁性InP(100)基板の上に、ノンドープ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ パuffers層110nm、ノンドープ $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ チャンネル層16nm⁴⁾、ノンドープ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 電子分布制御層4nm¹⁰⁾、ノンドープ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ スペーサ層5nm、 $1.2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ Siドープn型InAs/ $1.2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ Siドープn型AlAs超格子ドープ層5周期、ノンドープ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ゲートコンタクト層20nm、 $1.2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ Siドープn型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ キャップ層が順に形成されている。ここで、DIASのInAsとAlAsの各膜厚は2分子層とした。

この基板を用いて、ゲート長 $0.5\mu\text{m}$ 、ゲート幅 $50\mu\text{m}$ のDIAS-HEMTを作製し、DC特性を評価した。DC特性評価においては、ソース-ドレイン間電圧 $V_d=2\text{V}$ 、ゲート-ソース間電圧 $V_g=-1.0\sim+0.6\text{V}$ のバイアス条件で、ソース-ドレイン間電流 I_d 、ゲート-ソース間電流 I_g 、しきい値電圧 V_t 、相互コンダクタンス g_m を測定した。

DIAS-HEMT構造のシートキャリア濃度 n_s 低下に対する抑制効果を確認するために、 $300\sim 450$ の熱処理によるDIAS-HEMT構造のシート抵抗 R_s 変化を評価した。 R_s は $(q \times \mu \times n_s)^{-1}$ であり、電子移動度 μ と n_s の積の逆数に比例する。 μ は、熱処理前後でほとんど変化しないことがわかっているため⁵⁾、 R_s の増加量の測定は n_s の低下量の測定と等価であると考えられる。 n_s の低下抑制効果の評価するために、富士原らにより提案されたSPRINT構造⁷⁾と、 n 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 変調ドープ層を用いた従来構造の R_s (92 /)も同時に評価した。今回の評価では、DIASとSPRINTのシートキャリア濃度低下抑制効果を比較するために、DIASとSPRINTの超格子の InAs と AlAs の各膜厚を2分子層に、また周期数を5周期に統一した。 R_s が10%増加する時間をアレニウスプロットし、シート抵抗増加の活性化エネルギー E_a を求めた。

また高温連続通電試験により、DIAS-HEMTと n 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 変調ドープ層を用いた従来HEMTのDC特性劣化の違いも評価した。高温連続通電試験条件は、 125°C 、 $V_d=2.5\text{V}$ 、 $V_g=0\text{V}$ で、 n_s の低下により増加が予測される I_d の変化を2,000時間まで評価した。また、ショットキゲートの劣化により増加する可能性があるゲート電流 I_g についても、合わせて測定した。

4. 結果および考察

4.1 DIAS-HEMTのDC特性

Fig.5に、DIAS-HEMTの I_d - V_d 特性を示す。DIAS-HEMTは、バンドギャップが小さい InAs ($E_g=0.356\text{eV}$ (室温))を含むため、ゲート電極のショットキ特性の低下によるピンチオフ特性不良が懸念される。しかし、DIAS-HEMTはピンチオフしており、 InAs を含んだ層を変調ドープ層に用いることが可能であると考えられる。また、測定された g_m は 750mS/mm であり、 $0.5\mu\text{m}$ のゲート長を持つ従来型HEMTの g_m とほぼ同じである。よってDIASは、HEMTの変調ドープ層に適用できると考えられる。

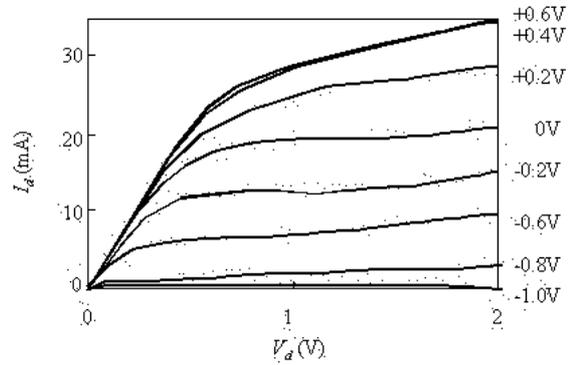


Fig. 5. DC characteristic of DIAS-HEMT

4.2 $300\sim 450$ の熱処理による n_s 低下量の評価

Fig.6に、 350 の熱処理による R_s の変化を評価した結果を示す。Fig.6より、SPRINTの R_s 低下量は、 n 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 変調ドープ層を用いた従来構造の R_s 低下量よりも小さい。この結果は、SPRINTが R_s 低下の抑制に効果があることを示している。しかし、DIASの R_s 低下量は、SPRINTの R_s 低下量よりもさらに小さい。つまり、DIASは R_s 低下の抑制において、SPRINTを超える効果があることがわかった。また、 $300\sim 450$ の熱処理範囲で、 R_s が10%低下する時間を測定し、アレニウスプロットから E_a を求めた。その結果、DIAS、SPRINT、従来構造の E_a は、それぞれ 1.85eV 、 1.81eV 、 1.68eV であった。

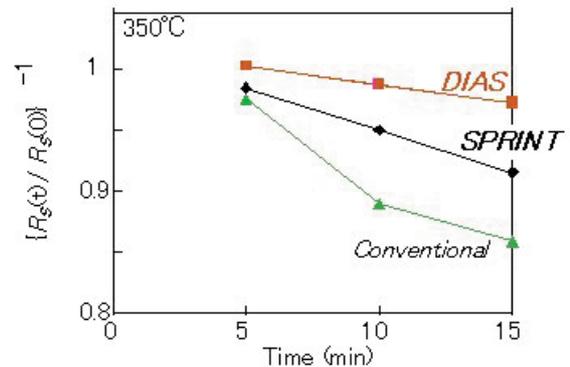


Fig. 6 R_s variation in HEMT wafer at 350 annealing

ここで、DIASとSPRINTの R_s 低下を抑制するメカニズムは異なっている。DIASの場合、キャリアを供給する変調ドープ層、すなわち n 型 InAs / n 型 AlAs 超格子が、 n_s の低下を抑制する。一方、SPRINTは、 F の保護層、すなわち n 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 変調ドープ層直上

のノンドープInAs/ノンドープAlAs超格子が、 n_s の低下を抑制する。今回の実験でのDIASとSPRINTの n_s 低下抑制量の差は、SPRINTの超格子では300-450の範囲において、Fからn型In_{0.52}Al_{0.48}As変調ドープ層を十分に保護できないために生じたと考えられる。一方、DIASを構成するn型InAsとn型AlAsは、350の熱処理後でも3%の n_s 低下しかないため、DIASはSPRINTより、 n_s 低下の抑制に対して効果が大きいと考えられる。

4.3 125 高温連続通電試験による I_g および I_d 変化量の評価

Fig.7に、DIAS-HEMTの125℃、2,000時間の高温連続通電試験の結果を示す。ゲート-ソース間電流 I_g は±5μAの範囲内での変化にとどまり、懸念されたゲート電極のショットキ特性の劣化は発生しなかったことを表している。一方、ソース-ドレイン間電流 I_d は、高温連続通電試験により5.2%の低下を生じた(標準偏差=0.9%)。この I_d の低下はDIAS-HEMT構造の n_s 低下に起因するものと考えられる。

これに対し、n型In_{0.52}Al_{0.48}Asドープ層を用いた従来構造のソース-ドレイン間電流 I_d は、高温連続通電試験により7.6%の低下を生じた(標準偏差=1.0%)。高温連続通電試験におけるDIAS-HEMTの I_d の低下量は、従来構造のHEMTに比べて少なくなっておりDIASの n_s 低下の抑制効果を裏付けているが、 I_d の低下を完全に防止するには至っていない。n型InAsおよびn型AlAsでも350の熱処理により、3%の n_s 低下が生じており⁵⁾、これが高温連続通電試験での I_d の5.2%低下の原因となっていると考えられる。

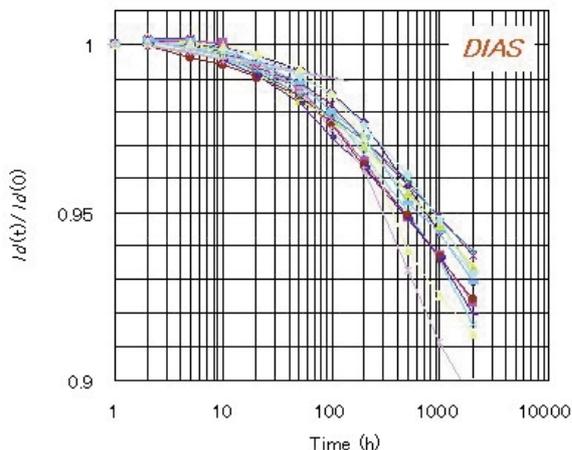


Fig. 7 BT test results for DIAS-HEMT at 125 for 2,000 h

5. 結論

我々は、熱処理によるシートキャリア濃度 n_s の低下を抑制できるDIAS-HEMTを開発した。350℃高温保存試験において、DIAS-HEMT構造のシート抵抗 R_s 増加の活性化エネルギー E_a は1.85eVで、SPRINTの E_a 、1.81eVより大きいことを示した。また、高温連続通電試験におけるDIAS-HEMTのソース-ドレイン間電流 I_d の低下量は5.2%で、n型In_{0.52}Al_{0.48}As変調ドープ層を用いた従来構造の I_d の低下量7.6%よりも小さいことを明らかにした。以上のように、DIAS-HEMTは、InAlAs/歪InGaAs系のHEMTで問題となる、キャリア濃度 n_s 低下の抑制に有効であることを確認できた。

<参考文献>

- 1) L.D.Nguyen, A.S.Brown, M.A.Thompson and L.M. Jel-loian : IEEE Trans.Electron Devices 39(1992)P.2007.
- 2) T.Enoki, M.Tomizawa, Y.Umeda and Y.Ishii:Jpn.J. Appl.Phys.33(1994)P.798.
- 3) M.Wojtowicz, R.Lai, D.C.Streit, G.I.Ng, T.R.lock, K.L.Tan, P.H.Liu, A.K.Freudenthal and R.M.Dia : IEEE Electron Device Lett.15(1994)P.477.
- 4) Y.Sugiyama, Y.Takeuchi and M.Tacano : J. Cryst. Growth 115(1991)P.509.
- 5) 田口隆志, 小原輝昭, 松ヶ谷和沖, 上野祥樹, 服部正 : 第55回応用物理学会学術講演会予稿集, 19p-ME-15 (1994)
- 6) N.Hayafuji, Y.Yamamoto, N.Yoshida, T.Sonoda, S. Takamiya and S.Mitsui : Appl.Phys.Lett.66(1995)P.863.
- 7) A.Fujihara, K.Onda, T.Nakayama, H.Miyamoto, Y. Ando, A.Wakejima, E.Mizuki and M.Kuzuhara : Electron. Lett. 32(1996)P.1039.
- 8) R.People and J.C.Bean : Appl.Phys.Lett.47(1985)P.322
- 9) 恩田和彦, 富士原明, 分島彰男, 水木恵美子, 中山達峰, 宮本広信, 金森幹夫 : 1997年電子情報通信学会総合大会予稿集, SA-8-4(1997)
- 10) 松ヶ谷和沖, 田口隆志, 上野祥樹, 服部正 : 第53回応用物理学会学術講演会予稿集, 7a-ZL-8(1992)



< 著 者 >



小原 輝昭
(こはら てるあき)
基礎研究所 第2 研究
高周波デバイスの開発に従事.



田口 隆志
(たぐち たかし)
基礎研究所 研究企画室
ミリ波通信システムの開発に従事.



星野 浩一
(ほしの こういち)
基礎研究所 第2 研究
高周波デバイスとその応用システ
ムの開発に従事.