



Title	原子間力顕微鏡（AFM）によるInAs系ヘテロ構造のナノスケール加工とデバイス応用
Author(s)	佐々, 誠彦; 中島, 貴史; 井上, 正崇
Citation	電気材料技術雑誌. 2002, 11(2), p. 134-145
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/81701">https://hdl.handle.net/11094/81701</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 原子間力顕微鏡 (AFM) によるInAs系ヘテロ構造の ナノスケール加工とデバイス応用

佐々 誠彦、中島 貴史、井上 正崇

大阪工業大学工学部電気電子システム工学科  
〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1

## Nanoscale Fabrication and Device Applications of InAs-based Heterostructures using Atomic-Force Microscope

Shigehiko SASA, Atsushi NAKASHIMA and Masataka INOUE

Electrical and Electronic Systems Engineering Department, New Material Research Center,  
Bio-Venture Center, Osaka Institute of Technology,  
5-16-1 Asahi-ku Ohmiya, Osaka 535-8585, Japan

We describe nanofabrication processes developed for the fabrication of InAs/AlGaSb heterostructures using atomic-force-microscope (AFM) oxidation and applications to the fabrication of nanoscale devices such as single-electron transistors. Oxidation processes were developed for GaSb, GaSb/AlSb, and InAs layers. We demonstrate that our AFM oxidation processes are simple and useful by showing each fabrication process and corresponding device structure and characteristics.

KEYWORDS : atomic-force microscope, anodic oxidation, InAs, GaSb, AlSb, nanoscale fabrication, single-electron transistor, nanostructure device

キーワード : 原子間力顕微鏡、陽極酸化、インジウム砒素、ガリウムアンチモン、アルミニウムアンチモン、ナノスケール加工、単電子トランジスタ、ナノ構造デバイス

### 1. はじめに

走査型トンネル電子顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) は原子スケールでの観察ツールとして広く利用されている。最近では、観察用ツールとしてだけでなく、加工のためのツールとしてもさまざまな形で利用されている。STM を利用したシリコン表面の酸化と、その酸化膜をマスクとした選択的なエッチングが可能であることを示したのは Dagata<sup>1)</sup> らのグループである。Snow<sup>2)</sup> らはその方法を GaAs に適用し、酸化が起こることを報告している。その後、AFM による加工が化合物半導体の加工<sup>3,4)</sup>、デバイス加工<sup>5-7)</sup> に適用できること、さらに金属の単電子

トランジスタの加工にも利用できること<sup>8,9)</sup> が示された。

ところで、ここで使用する InAs 系半導体ヘテロ構造は格子定数が 6.1Å 程度の半導体グループに属し、III-V 族化合物半導体の中でも電子の有効質量が小さく飽和速度が大きいため、高速デバイス用材料として優れた性質を持つだけでなく、同じグループに属する AlSb を障壁層として利用した場合には強い閉じ込め効果により、大きな量子効果が期待される。また、GaSb や AlSb とのヘテロ構造はタイプ II 型のバンド構造となるため長波長光デバイス用の材料としても有望な材料系である。

この系の特徴は、不純物のドーピングを行わなくても InAs チャンネル層中に高濃度の二次元電子ガスが形成されることで、その濃度は表面の物質やチャンネル層から表面までの距離に非常に敏感なことである。さらに特徴的なことは、チャンネル層を表面に近づける程その電子濃度が増加することである<sup>10)</sup>。

この論文では、InAs 系材料へのナノ加工技術として、原子間力顕微鏡 (AFM) を利用した陽極酸化プロセスの基本特性の検討結果およびデバイス加工への適用例について述べる。

## 2. AFM 陽極酸化プロセスとデバイス加工プロセスの開発

### 2.1 GaSb への陽極酸化プロセス

InAs チャンネル層に形成される電子ガスの濃度が表面に敏感であることを利用して、はじめに、表面層である GaSb 層への陽極酸化プロセスの検討を行った。ここでは電子デバイス用に使用する層構造 GaSb (10nm) / AlGaSb (15nm) / InAs (15nm) / AlSb を念頭に、GaSb (10nm) / AlGaSb (10nm) のヘテロ構造を使用して AFM 酸化の基本特性を調べた。酸化は空气中 (湿度約 50%) で行い、カンチレバーに導電性を持たせるために、Au をコーティングしたものをを用いた。探針の走査速度は10nm/s、探針への印加電圧は0V から-35V まで変化させて行った。また、探針は通常のコンタクトモードで走査した。

図1は GaSb 表面を直線状に酸化した後の AFM 像である。各線の酸化電圧は図中に示すとおりである。酸化によって、その部分の高さが

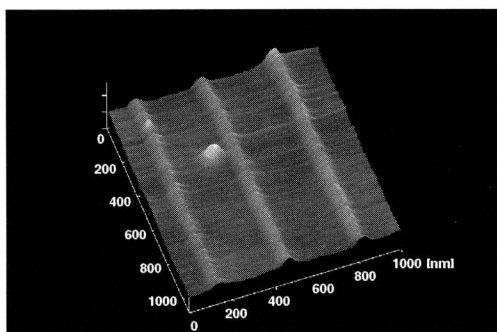
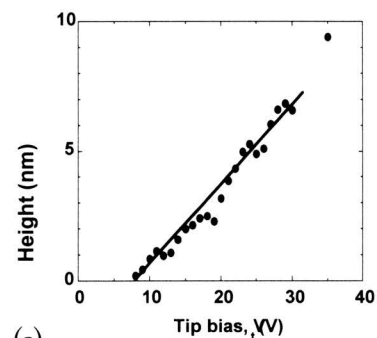
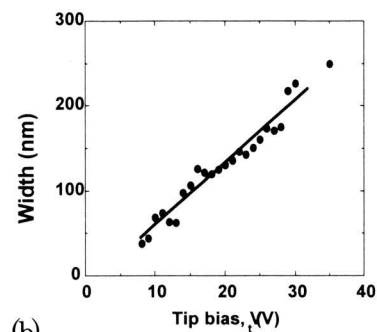


図1 AFM 酸化後の酸化部分の AFM 像。酸化電圧は13, 14および15V で、酸化時の探針の走査速度は10nm/s である。

増加していること、電圧の増加とともに高さが増加していることがわかる。これは酸化による体積の増加に対応している。ここに示すわずかな電圧変化に対しても酸化後の高さのみならず、酸化された部分の幅も変化していることは、酸化プロセスの制御性の良さを示している。また、調べた電圧範囲で、酸化部分の高さ、幅とも電圧の増加に対して一様な増加傾向を示した。この結果を図2(a) および図2(b) に示す。図からわかるように GaSb の酸化が起こるには最低7から8V 程度の電圧を印加する必要がある。また、加工精度に関して、酸化幅として100nm 程度の加工が容易に実現できることもわかる。このように AFM 陽極酸化プロセスは InAs/AlGaSb 系ヘテロ構造の表面を変調するための簡易な加工プロセスとして使用できることがわかる。



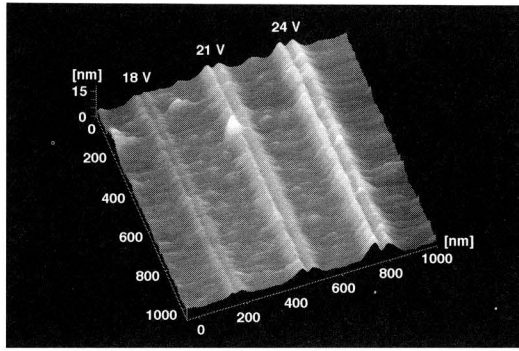
(a)



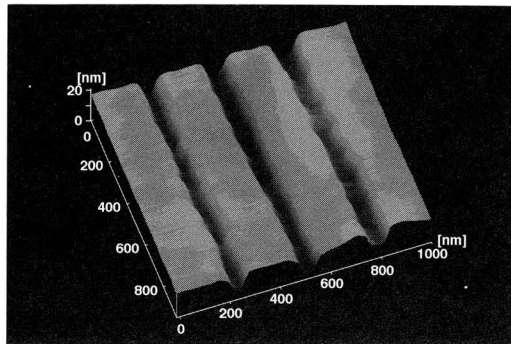
(b)

図2 GaSb 上に AFM 酸化を行った後の酸化高さおよび酸化幅の印加電圧依存性。

酸化により表面の状態を変調することは可能であるが、物理的な形状の加工が可能かどうかを調べるため、次に、酸化後の試料を純水に浸し、その変化を調べた。陽極酸化後に酸化した



(a)



(b)

図3 酸化電圧18, 21, 24Vで酸化した直後のAFM像 (a) および10分間水に浸けた後の試料のAFM像 (b)。

部分が水に可溶性になることは GaAs では報告例があるが<sup>3)</sup>、我々は GaSb でも同様の現象があることを確認した。図3 (a) および図3 (b) はAFM酸化を行った直後のAFM像および酸化後GaSb 酸化物を除去するために10分間水に浸けた後の試料のAFM像である。このときの酸化電圧は図中に示すように、18, 21, および24Vである。図3 (a) からわかるように、この電圧領域では図1に比べ酸化部分が二分されているように見える。これは高電圧領域では酸化がより早く起こるために、酸化中に酸化の先端部と探針が接触するためであると考えられる。また、図3 (b) に見られるように、水によって酸化した部分だけを選択的に除去することができる。さらに、溝の幅は酸化電圧の増加とともに増加する。一方、溝の深さはほぼ一定となっている。図4には酸化直後の高さとおよび水により酸化物を除去した後の溝の深さの関係を示した。データに多少のばらつきがあるものの、酸化後の高さが2nm以上では、溝の深さが10nmに達しほぼ一

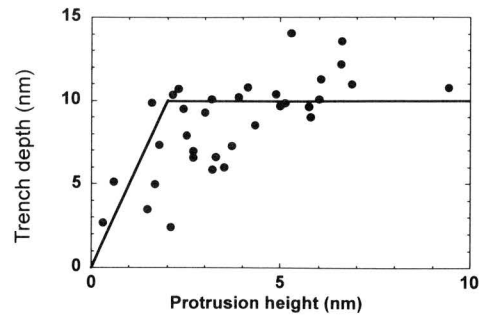


図4 酸化直後の高さに対する、水に浸けた後の溝の深さ。

定になっていることがわかる。この深さは GaSb 層の厚さに相当し、したがって、このプロセスでは GaSb の酸化物だけが選択的に除去されていることがわかる。なお、深さが10nmに達する酸化電圧は15Vである。したがって、これ以上の電圧で酸化を行うと GaSb 層はすべて酸化される。そこで、以下の実験では厚さの変調をできるだけ大きくするために、GaSb 層すべてを酸化できる条件（酸化電圧20V）で酸化を行った。

## 2.2 デバイス構造の作製

AFM酸化に関する以上の検討結果をもとに、InAs/AlGaSb ヘテロ構造に、この加工プロセスを適用し、デバイス加工への適用性を調べた。加工の影響が電子ガスに及んでいることを確かめるため、二端子の素子を作製し、端子間の表面を電流の流れる向きとは垂直な方向に周期的に酸化を行った。加工に使用した素子の層構造は、表面側から次のようである。GaSb (10nm) / AlGaSb (5nm) / AlSb (5nm) / InAs (15nm) / AlSb (8nm) / AlGaSb (0.2 $\mu$ m) さらにその下に AlSb / GaSb 超格子を含むトータル2 $\mu$ m程度のバッファ層を有している。この構造は半絶縁性 (100) GaAs 基板上に MBE 法により成長した。前述のとおり、この系では不純物のドーピングを行うことなく InAs チャンネル層中に高濃度の二次元電子ガス層が形成される。ここでは、二次元電子ガス層への可能な影響が大きくなるよう、チャンネルから表面までの距離を20nmと薄くなるような構造を選んだ。

二端子構造の加工には、通常の写真リソグラフィとケミカルエッチングを用い、幅 $1\mu\text{m}$ 程度の細線構造を作製した。細線の両端に In/Au 電極によるオーミック電極を蒸着、リフトオフにより作製した。細線の長さは約 $10\mu\text{m}$ であり、この細線形状では、加工前の InAs 中の電子は二次元の状態にある。この細線の中央部分の約 $3\mu\text{m}$ にわたり AFM 酸化加工による $0.3\mu\text{m}$ を周期とする周期構造を作製した。図5は酸化加工および水によるエッチングを施した後の細線中央部分の AFM 像である。図のように周期的な構造が設計通りに形成されていることがわかる。

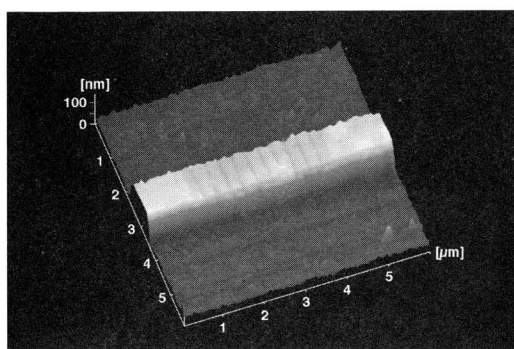


図5 AFM 酸化によって作製した、周期構造を有する細線構造。細線の中央部 $3\mu\text{m}$ にわたり $0.3\mu\text{m}$ 周期の加工が施されている。

加工形状が InAs チャンネル中の二次元電子ガスに及ぼす影響を調べるために、 $4.2\text{K}$ での磁気抵抗効果を測定した。磁場が $1\text{T}$ を越えるあたりから磁気抵抗振動（シュブニコフ・ドハース振動）が現れ、対応する電子濃度が $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ であることがわかった。この電子濃度は加工を施していない試料に比べ $80\%$ 高い値であり、加工により平均の電子濃度が増大していることがわかる。これは、加工によって、チャンネル層から表面までの距離が平均的には減少したために電子濃度が増加したと考えることで説明される。したがって、マイクロなスケールでは加工した部分の下でのみ電子濃度が増加し、加工形状に対応した電子濃度の濃淡がチャンネル中に形成されているものと期待される。このような構造では、その幾何学的な周期に対応し、磁気抵抗

振動にも新たな周期構造が現れる。これはワイズ振動<sup>11)</sup>と呼ばれるが、ここで作製した周期と電子濃度からは $1.2\text{T}$ 付近に磁気抵抗の極大値を持つはずであるが、今回の実験では、そのような磁気抵抗の振動成分は観測されなかった。その理由は、ここで作製した細線幅が狭く、上記の磁場に対応する電子のサイクロトロン直径が細線幅とほぼ同程度であるために、細線中でのサイクロトロン運動が抑制されたためと考えることができる。

以上の結果、AFM 酸化加工プロセスが InAs / AlGaSb 系ヘテロ構造の加工に有効であることを示すことができた。しかしながら、上記の実験では、溝加工の深さにややばらつきがあったこと、細線の幅が狭く、周期構造が電子ガスに与える影響を見ることができなかつた等の問題があった。そこで、次に加工精度の改善および周期構造が電子系に及ぼす影響を観測するために行った実験内容について述べる。

### 2.3 薄い GaSb 表面層を持つ構造の AFM 酸化加工

AFM 酸化加工の加工深さの精度を改善するために GaSb 層の厚さを変え、酸化加工電圧と加工形状の比較を行った。前節で述べた実験で加工の溝深さや形状にばらつきが生ずる原因は、酸化が GaSb 層の底まで達していないため、エッチング後の形状にばらつきが生ずるためと考えられる。したがって、より強い酸化を行うことで形状を改善することもできる。しかしながら、より強い加工を行うためには酸化電圧を高くする必要がある。酸化電圧を高くすると図2からわかるように、酸化幅が増加するため、微細な加工がしにくくなる他、探針からの Au の蒸発が起こり探針の摩耗も問題となる。そこで、ここでは酸化電圧をあげることなく、加工精度を向上させるため、加工に使用する試料の層構造を変更することにした。

使用した試料構造は、GaSb ( $5\text{nm}$  および $10\text{nm}$ ) / AlGaSb ( $10\text{nm}$ ) である。GaSb 層の厚さを薄くすることにより、従来の加工電圧で GaSb 層の底

まで十分な酸化が起こるはずである。比較のために前節の試料と同じ構造の試料と GaSb 層の厚さを半分にした試料の二種類に AFM 酸化加工を施し、形状の比較を行った。酸化の条件(探針、酸化速度、湿度等)も前節と同等である。酸化電圧は15V から30V とした。

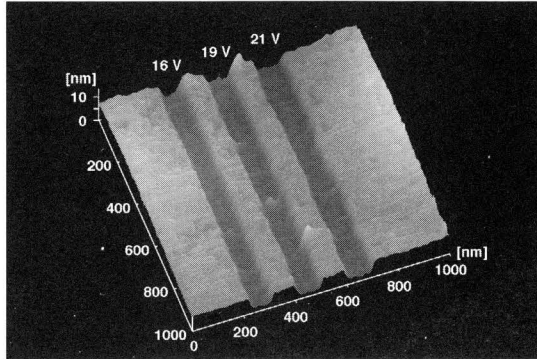


図6 GaSb 層の厚さが5nm の試料を AFM 酸化加工した後の AFM 像。

図6は、AFM 酸化後、水によるエッチングを施した後の試料表面の AFM 像である。どの酸化電圧においても、図3(b)とは異なり、一定の幅(約0.1 $\mu$ m)の溝が形成されていることがわかる。また、電圧の増加にともなう線幅のわずかな増加が見られるものの、溝の深さはどの電圧でも一定である。これを従来の構造と比較したものが図7である。図は加工後の溝の形状の断面プロファイルを AFM により測定したものである。図から明らかなように、GaSb が5nm の試料では、どの酸化電圧でも矩形の溝が形成されている。一方、GaSb 10nm の試料では、酸化電圧がやや高いにも関わらず、断面形状は5nm の試料ほど良好ではない。また、酸化電圧が18V の場合には酸化が完全に GaSb 層の底に到達していないこともわかる。このように、加工形状の制御性を良くするという点に関し、GaSb 層を薄くすることが非常に有効であることがわかった。しかしながら、表面層の厚さに対して電子濃度が変化する、この材料系では表面層の厚さの変化が小さくなる、この構造で十分な変調効果がえられるかどうか問題である。そこで、二次元電子系への影響を調べるために、前節2.2で行ったようなデバイスを作製

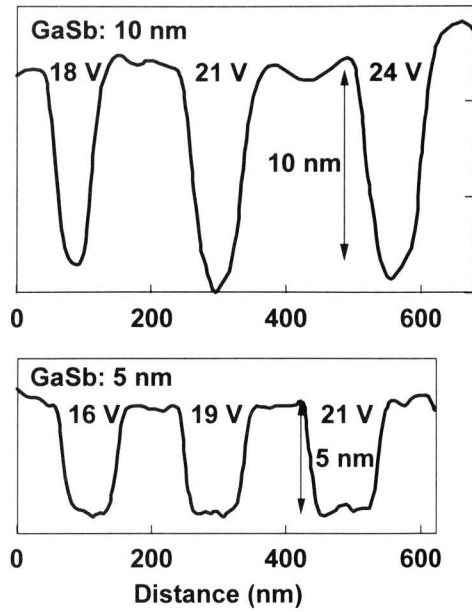


図7 表面層である GaSb 層の厚さが異なる二種類の試料に AFM 酸化加工を施し、エッチングを行った後の断面プロファイル。

し、低温での磁気抵抗測定を行った。

ここで使用したデバイス構造は、基本的には2.2節で述べたものに類似のものである。ただし、チャンネル層の幅は2 $\mu$ m とし、四端子測定も可能なように、ホールバー形状の試料を作製した。そして、ホールバーの電圧端子間に、周期0.3 $\mu$ m の周期的な加工を施した。図8に磁気抵抗振動の測定結果を示す。四端子法で評価した磁気抵抗特性に加え、挿入図には二端子測定時の磁気抵抗も示している。二端子での測定には、加工していない部分も測定に寄与するために、

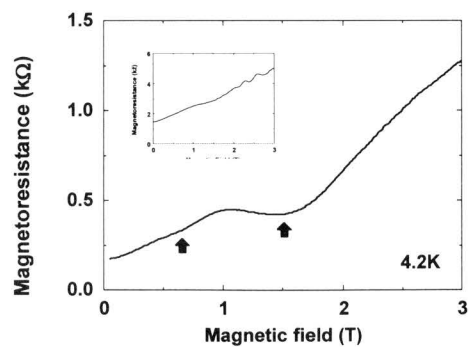


図8 四端子法での磁気抵抗の測定結果。緩やかな振動はワイズ振動に対応し、矢印はその計算値を示している。挿入図は、二端子での測定結果を示している。非加工の部分からのシュベニコフ・ド・ハース振動が観測されており、電子濃度を求めることができる。

その部分の二次元電子ガスのシュブニコフ・ド・ハース振動も1.5T以上の磁場領域では観測されている。図中の上向き矢印は、非加工領域の磁気振動から求めた電子濃度に基づき計算したワイス振動の極小値の位置を示している。実験値との良好な一致が得られている。したがって、本 AFM 加工により、電子系には加工の周期に対応した電子濃度の変調が起きていることがわかる。

以上、AFM 酸化による GaSb 層の加工、およびそれを利用したデバイス構造の試作を行い、加工形状に応じた電子系への変調が実現できることを示した。しかしながら、この方法ではチャンネル層自身を加工することはできず、より広いデバイス加工への適用には問題がある。そこで次節では、AFM 酸化を利用した InAs チャンネル層の加工方法について述べる。

## 2. 4 InAs チャンネル層の加工

### 2.4.1 パターン転写プロセスによる加工

単電子トランジスタ等、ナノスケールデバイスの実現には、電子が走行する層自身の形状をナノスケールで加工する必要が生ずる。本節では、AFM 酸化により、これまでに使用したヘテロ構造の InAs チャンネル層の加工プロセスについて検討する。

GaSb/AlGaSb/InAs ヘテロ構造では、InAs チャンネル層を加工するためには、最上層の GaSb のみでなく AlGaSb 層も加工する必要がある。そのため、AFM 酸化の後、AlGaSb をも通常エッチングするアルカリ系現像液でエッチング速度が酸化後どのように変化するかを調べたところ、酸化していない部分に比べ酸化を行った部分ではエッチング速度が非常に大きくなることを見出した。前節では酸化後の試料を水に浸けることで、酸化した部分を選択的に除去できることを報告したが、水の代わりに現像液を使用することで、GaSb/AlGaSb をほぼ選択的に取り除くことができることがわかった。現像液では InAs 層は全くエッチングされないが、加工された GaSb/AlGaSb 層をマスクに InAs のみを選択

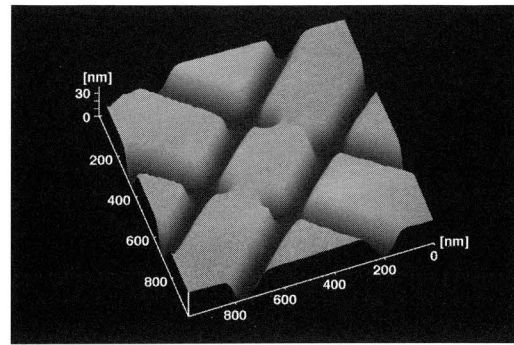


図9 AFM 酸化後、現像液により GaSb/AlGaSb 層をエッチングし、その後 InAs 層をエッチングした後の AFM 像。

的にエッチングすることができる。このような作製プロセスが可能となることが異なる V 族元素を含むヘテロ構造の特徴である。図9は AFM 酸化の後、現像液によるエッチングと酢酸系エッチング液による InAs 層までのエッチングを行った後の AFM 像である。図のように深さ30から40nmの溝が形成されていることがわかる。この加工プロセスでは、InAs 層の加工を GaSb/AlGaSb 層に形成した形状をマスクにしたエッチング、すなわち、転写プロセスにより形成している。ここで形成した細線形状は単電子トランジスタの作製を念頭においたものであるが、細線状のチャンネルの途中に二カ所スリット状の形状も形成されている。これらの中央部が電荷島として機能する部分であり、その大きさを制御することが重要である。上記のパターン転写プロセスにより、上部の GaSb/AlGaSb 層の形状より、InAs 層の寸法はサイドエッチング分減少する。そこで、上部の層を取り除き、InAs 層を露出させてその形状を観測したものが図10であ

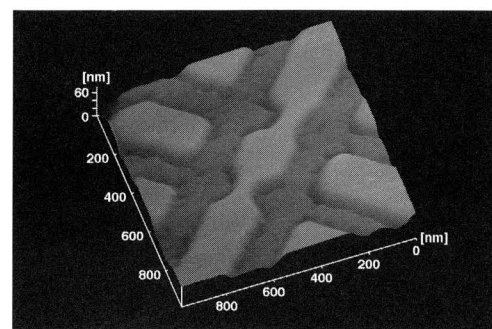


図10 上部 GaSb/AlGaSb 層をエッチングし、InAs チャンネル層を露出させて観察した AFM 像。

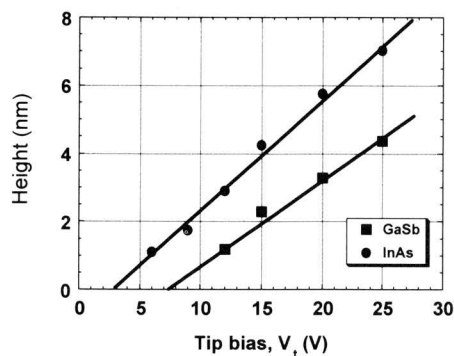
る。図のように、サイドエッチングはあるものの、中央の電荷島、それを形成するスリット部等が形成されていることが確認できる。

このように、AFM 酸化により GaSb/AlGaSb 層を酸化し、酸化部分を現像液により除去、それをマスクに InAs を加工することができることが示された。このプロセスを単電子トランジスタの作製に応用した例については講述する。このプロセスでは既に述べたように、パターン転写プロセスによる加工形状のずれが問題となるため、続いてこのような転写プロセスを利用しない加工法について検討した結果について報告する。

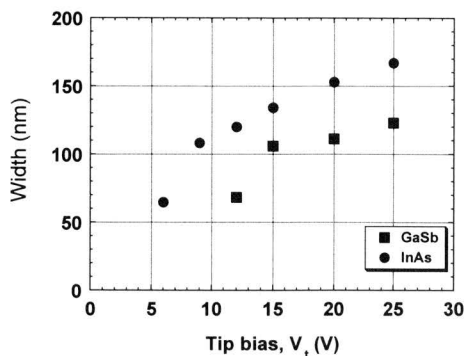
#### 2.4.2 InAs 層への直接酸化プロセス

この節では、InAs 層に直接 AFM 酸化プロセスを施し、加工プロセスの適用可能性について検討した結果について検討する。

はじめに、InAs 層の AFM 酸化基本特性につ



(a)



(b)

図11 InAs に直接 AFM 酸化を行った後の酸化高さ (a) および幅 (b) の酸化電圧依存性。

いて、GaSb の場合同様、酸化電圧に対し、酸化後の高さおよび幅を調べた。図11 (a) および11 (b) にその測定結果を示す。図中には比較のため GaSb の結果も示している。図のように InAs は GaSb より5V 程度低い電圧から酸化が始まる。通常、陽極酸化では p 形半導体の方が酸化が起こりやすいが、この結果では、通常 n 形となる InAs の方が酸化が起こりやすいという結果となった。この理由は明確ではないが、InAs の下に成長された AlSb あるいは AlGaSb 層からのホールの供給によるものではないかと考えられる。

AFM 酸化後の加工性を検討するため、エッチング特性について調べた。通常、InAs 層のみを選択的にエッチングできる酢酸系エッチング液に対し、酸化した部分は不溶性になることが見いだされた。図12はこの様子を示したもので、(a) は AFM 酸化直後の層を、(b) は酢酸系エッチング液で処理した後の AFM 像を示している。図から酸化した部分はそのまま残り、酸化されていない部分だけがエッチングされていること

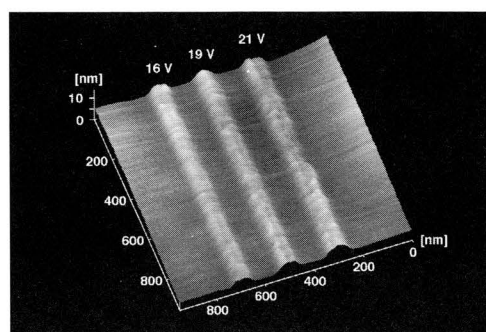


図12(a) InAs 層に AFM 酸化を施した後の AFM 像。

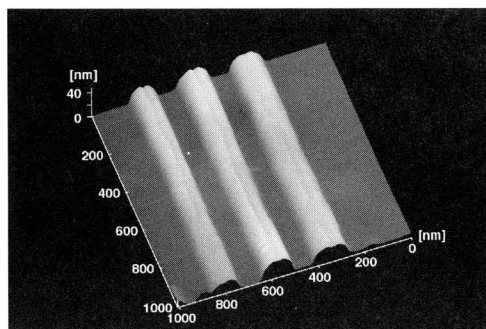


図12(b) InAs 層に AFM 酸化を施した後、酢酸系エッチング液によるエッチングを行った後の AFM 像。

がわかる。したがって、InAs 層の加工に AFM 酸化層をエッチングマスクとした加工などが可能となる。

### 2.4.3 InAs 酸化層の電気的特性の評価

ナノスケールデバイスの作製には単電子トランジスタのようにデバイス形状をナノスケールで加工する必要がある。AFM 酸化によりその部分の電気的特性が酸化前後で大きく変化すればそれを利用したデバイス加工が可能となる。そこで、この節では、AFM 酸化層自身の電気的特性の評価結果について述べる。電気的な評価を行うために、数ミクロンのチャンネル幅を持つ二端子素子を作製し、その中央部を酸化することによって、酸化層を通しての電流・電圧特性を評価した。

図13は二端子素子の形状と酸化の様子を示したものである。本実験に使用した試料の層構造は表面から InAs (10nm)/AlGaSb (200nm) その下には GaSb/AlAs 超格子を含む2 $\mu\text{m}$  程度のバッファ層を基板上に成長した。酸化電圧は25V とした。この電圧で酸化を行うと10nm の InAs 層を十分に酸化することができる。

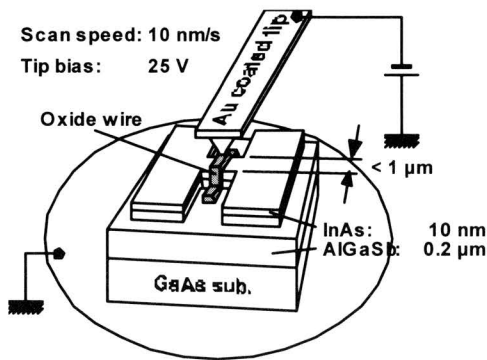


図13 二端子素子の形状と酸化箇所および酸化条件を示した。InAs チャンネル層の厚さは10 $\mu\text{m}$  である。

図14は二端子間の電流・電圧特性を温度を変えて測定した結果である。図のように、室温でも非線形な特性が得られ、200K 以下では約0.5V の耐圧を示している。この結果は、InAs の酸化物が絶縁性を持つことあるいは InAs に対して障壁層となることを示している。酸化により導

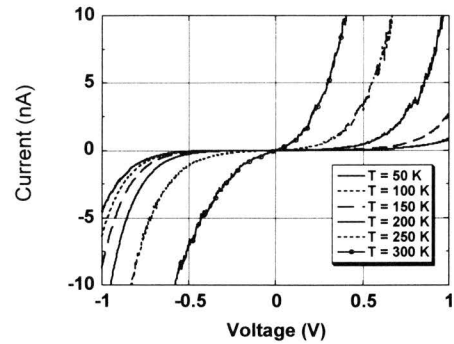


図14 中央を AFM により酸化した InAs 層の電流・電圧特性の温度依存性。室温でも非線形な特性が得られている。

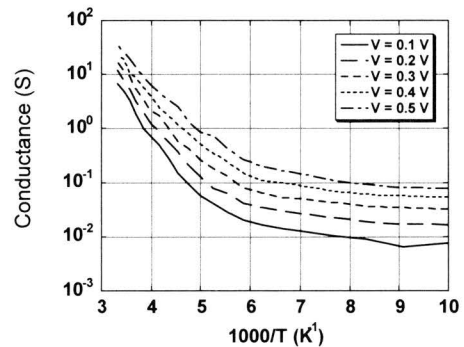


図15 各電圧での伝導度の温度依存性。200K 以上の温度では熱刺激電流が主であることがわかる。

電性の InAs が絶縁性を示すことになれば、デバイス加工の上で非常に簡便なプロセスを実現することができる。そこで、この電流・電圧特性を横軸を温度の逆数でプロットし、各電圧での電流の温度依存性から電流が熱刺激電流が主である温度領域で障壁層の障壁高さを求めることを試みた (図15)。図のように200K より高温側では熱刺激電流が主となり、低温側ではトンネル電流が主となるため、ほぼ一定の電流値となっている。電圧が0.1V から0.5V の各電圧で活性化エネルギーを求め、印加電圧が0V へ外挿した値から障壁高さを求めたところ、0.35eV という値が得られた。InAs 層の電子濃度が $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  と高いことから InAs と InAs 酸化物の伝導帯不連続は約0.5eV 程度であることがわかる。この値は電流・電圧特性に見られる耐圧の値とも良い一致を示している。この障壁高さは低温では十分な高さがある。したがって AFM 酸化により、非常に簡単にデバイス形状を規定することができ、ナノスケールデバイスの加工に応用す

ることが可能である。続いての節では、ここで検討した加工法を単電子トランジスタ等のデバイス加工に適用した結果について述べる。

### 3. AFM 陽極酸化プロセスによるデバイス作製と特性の評価

#### 3.1 エッチング転写プロセスによる単電子トランジスタの作製

はじめに、2.4.1節で述べたエッチング転写プロセスによる単電子デバイスの作製およびそのデバイス特性について述べる。

図16がデバイスの立体図である。使用した試料の構造は InAs (15nm) チャネル層の上に GaSb (10nm)/AlGaSb (15nm) を成長した構造である。デバイスの加工プロセスは以下のようにある。

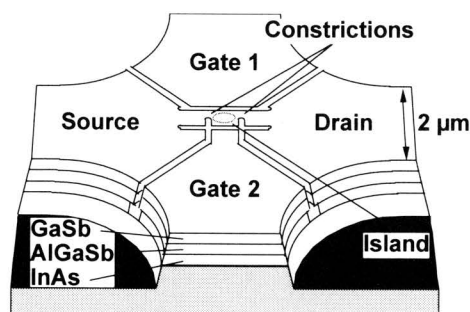


図16 作製した単電子トランジスタの立体図。十字形のメサ形状の中央部に AFM 酸化およびエッチング転写プロセスにより単電子トランジスタを形成した。形成した構造の中央部に電荷島が形成されている。

通常の写真リソグラフィと化学エッチングにより、 $2\mu\text{m}$  幅で十字形状のメサ構造を形成する。次に、中央部に AFM 酸化により図のような形状を酸化により形成し、上部層のエッチングおよび InAs へのパターン転写のエッチングを行いデバイス構造を形成する。最後に、十字形状の末端部分に蒸着、リフトオフにより In/Au のオーミック電極を形成する。図のように、デバイス構造はいくつかの直線を描いて形成することができるため、プロセスは比較的簡単である。具体的にはソース・ドレイン間に引かれた二本の直線でデバイスのチャンネルを規定し、それに垂直に描かれた2個のスリット構造

がトンネル障壁を形成している。したがって、それらに囲まれた中央部が電荷島である。また、InAs 系材料では良好なゲート電極を形成することが難しいので、ここではインプレーン形のゲート電極を形成した。この形状から Gate 1はスリット幅を制御するように働き、Gate 2は電荷島中の電荷量を制御するように働く。図10からわかるように、電荷島の大きさは直径 $250\text{nm}$ 程度の円形である。

作製したデバイスの特性を評価したところ、Gate 2では大きなリーク電流が見られたため、この後の特性は Gate 1のみを用いて測定した結果について述べる。図17は $4.2\text{K}$ で測定した、ゲート電圧に対するソース・ドレイン間のコンダクタンスである。ソース・ドレイン間電圧は $0.5\text{mV}$ である。ゲート電圧が $-3\text{V}$ 程度でオフ状態が得られている。したがって、通常のFET動作は確認することができた。

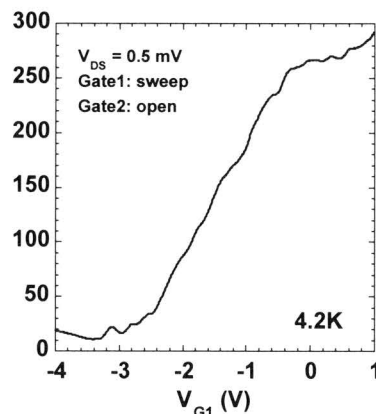


図17 作製した単電子トランジスタのFET特性。

さらに、ピンチオフ近傍の特性に注目すると、コンダクタンスに振動が見られることがわかる。単電子トランジスタでは電荷島を囲むそれぞれのトンネル接合のコンダクタンスが量子化コンダクタンス $2e^2/h$ より小さい領域で動作するのが通常であるが、コンダクタンスがその程度であれば、帯電効果による振動が見られる場合があることが報告されている。ここで見られる振動の周期は約 $0.3\text{V}$ である。電荷島の大きさとゲート電極までの距離等を考慮して容量を計算し求めたクーロン振動の周期は $0.2\text{V}$ 程度と

なり、概ね実験値と一致することから、この振動は単電子動作に基づくクーロン振動であるといえることができる。

図18は Gate 1の電圧を $-3V$ に保った時のソース・ドレイン間の電圧に対するドレイン電流とその微分コンダクタンスを示したものである。図のようにドレイン電圧が $5mV$ 以上のところで電流値が階段状に変化している。このような特性はやはりクーロン帯電効果によるもので、いわゆるクーロンステアケースと称される特性である。したがって、この素子がゲート電圧 $-3V$ 付近では単電子トランジスタとして動作していることがわかる。また、この結果により、ここで使用した AFM 酸化プロセスがこのようなナノスケールデバイスの加工法として利用できることも実証された。

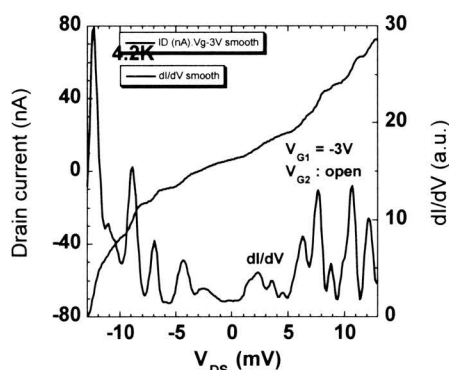


図18 作製した単電子トランジスタのクーロンステアケース特性。Gate 1の電圧は $-3V$ である。

### 3.2 InAs 直接酸化プロセスによる単電子トランジスタの作製

前節では GaSb/AlGaSb/InAs ヘテロ構造に AFM 酸化およびエッチング転写プロセスによるデバイス作製について述べた。そこで用いた試料は低温で通常 $100,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の高い移動度を示し、高速デバイスの他、低温では電子波干渉素子にも利用できるものである。しかしながら、単電子トランジスタの作製にはこのような高移動度の試料は必要なく、できればより明瞭な単電子動作のために電荷島の寸法をさらに微細化することがより優先される課題であ

る。そこで、本節では2.4.3節で得られた結果に基づき、InAs 層が最表面にある試料構造を用い、その表面層に AFM 酸化を施し、より微細な電荷島を持つ単電子トランジスタの作製を試みた結果について述べる。

使用した試料構造は、AlSb バッファ層  $0.75\mu\text{m}$ , 15周期の GaSb (6nm) / AlSb (6nm) 超格子、AlGaSb ( $0.2\mu\text{m}$ ), AlSb (8nm), InAs (10nm) チャンネル層、そして AlGaSb (15nm) / GaSb (10nm) の表面層を成長した。表面層はプロセス直前まで InAs 層を露出させないために成長した。InAs 層の厚さも十分に層全体が酸化するよう高移動度用の試料より  $5\text{nm}$  だけ薄くした。

試料作製プロセスは、InAs 直接酸化プロセスにより、さらに簡略化することができる。はじめに、上部 GaSb/AlGaSb 層を除去し、幅  $1\mu\text{m}$  以下程度の十字形状を中央に持つメサ構造を電子ビーム描画により形成する。レジストの PMMA を除去した後、すぐに AFM 酸化により単電子素子を描画する。最後にオーミック電極を形成し、素子が完成する。すでに述べたように、InAs 酸化物は InAs に対して障壁層となるため、酸化によりデバイスの形状を描画するだけで、試料を作製することができる点が、InAs 直接酸化プロセスの特徴である。図19に作製後の試料の AFM 像を示す。素子の構造は、ほぼ前節で述べたものと同様であるが、チャンネル等の形成にエッチングの行程が必要なく、その際に生ずるサイドエッチングによる拡がりなどが無いために、より小さな素子を作製することができる。図ではソース・ドレイン間に形成したチャンネル

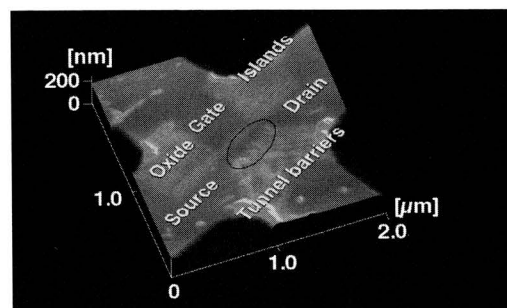


図19 InAs 直接酸化プロセスにより作製した単電子トランジスタの AFM 像。明るい部分が酸化により熱くなった部分すなわち障壁層に対応する。

に3カ所のスリットを形成し、電荷島を2個作製した構造となっている。1個の電荷島の実効的な大きさは100nm×100nm以下である。直接酸化プロセスの採用により、エッチング転写プロセスを無くしたことによって、電荷島の寸法を小さくすることができた。さらにInAsの有効質量が非常に小さいことを考えると、100nmという寸法は量子効果を観測するにも十分な領域である。

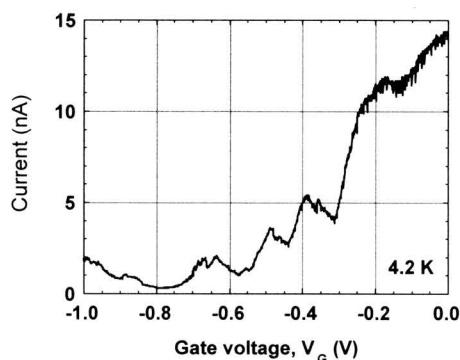


図20 AFM直接酸化プロセスにより作製したInAs単電子トランジスタ

図20には素子特性の一例を示す。この特性はソース・ドレイン間電圧2mVとし、ゲート電圧に対して、ドレイン電流を測定したものである。ゲート電圧が-0.8Vで素子はオフ状態になるが、それより高い（プラス側）ゲート電圧で電流の振動が見られる。振動の周期は0.1-0.2Vであり、前節で述べた素子に比べ電荷島のサイズが小さくなっていることに対応し、周期が増大していると考えられる。そこで、単電子動作をより明確に調べるために、電流が最も小さくなるゲート電圧（-0.8V）の前後で特性を詳細に調べた結果を図21に示す。図は横軸がゲート電圧、縦軸がソース・ドレイン間電圧で、ドレイン電流を濃淡で表している。色の白い部分が正の、黒い部分が負の電流に対応し、中間色の部分では電流がほとんど流れていないことを示している。図からゲート電圧が-0.75から-0.78V程度でドレイン電圧の広い範囲で電流が抑制されていることがわかる。このような特性はクーロンダイ

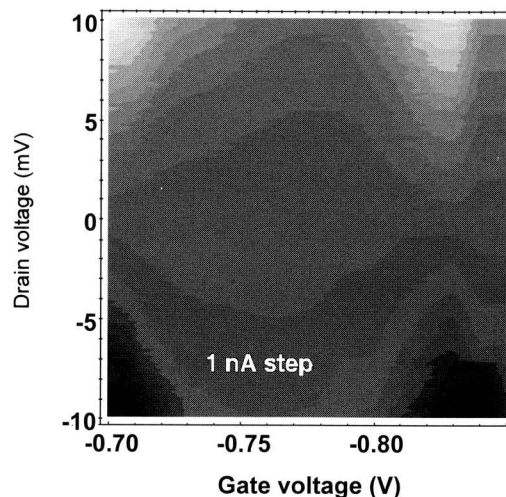


図21 InAs 直接酸化プロセスにより作製した単電子トランジスタのクーロンダイヤモンド特性。

アモンド構造と呼ばれ、この素子が明確な単電子トランジスタ動作をしていることを示すものである。

このように、InAs 直接酸化プロセスによりAFM酸化の加工精度を上げることができ、より明瞭な単電子トランジスタ動作を実現することができた。この加工法は単に単電子トランジスタの作製のみならず、InAs 中では電子波の位相干渉長が長いことを利用して電子波干渉素子の作製<sup>12)</sup>にも応用でき、ナノスケール加工技術として非常に有効である。

#### 4. まとめ

原子間力顕微鏡（AFM）を用いた陽極酸化を利用したInAs/AlGaSb系ヘテロ構造のナノ加工プロセスおよび単電子トランジスタ等のデバイス試作の結果について述べた。AFM陽極酸化は非常に簡便なプロセス技術を可能にするばかりではなく、加工ツールと観察ツールが同じであることから、加工後の状況がその場で観察でき、必要に応じて修正できるなど、従来の加工技術にはない特徴を有している。また、100nmレベルの加工が非常に簡単に実現できることも大きな特徴である。

ここでは、GaSbに対する酸化加工およびそれを利用したエッチングプロセスならびに、単電子トランジスタの試作結果について述べた。ま

た、InAs への酸化加工により、酸化部分が障壁層として働くことを見だし、それを利用したさらに簡便かつ微細な加工が可能なプロセスを開発し、単電子デバイスの試作により、そのナノスケール加工技術としての有効性を実証した。

#### 参考文献

- 1) J. A. Dagata, J. Schneir, H. H. Harary, C. J. Evans, M. T. Postek, and J. Bennett, *Appl. Phys. Lett.* 56, 2001 (1990).
- 2) E. S. Snow, P. M. Campbell, and B. V. Shanabrook, *Appl. Phys. Lett.* 63, 3488 (1993).
- 3) M. Ishii and K. Matsumoto, *Ext. Absr. 1995 Int. Conf. Solid State Materials and Devices, Osaka* (Business Center for Academic Societies Japan, Tokyo, 1995) p. 953.
- 4) Y. Okada, S. Amano, M. Kawabe, B. N. Shimbo, and J. S. Harris, Jr., *J. Appl. Phys.* 83, 1844 (1998).
- 5) S. Sasa, T. Ikeda, C. Dohno, and M. Inoue, *Jpn. J. Appl. Phys.* 36, 4065 (1997).
- 6) Y. Okada, S. Amano, Y. Iuchi, M. Kawabe, and J. S. Harris, Jr., *Electron. Lett.* 34, 1262 (1998).
- 7) R. Held, T. Vancura, T. Heinzl, K. Ensslin, M. Holland, and W. Wegscheider, *Appl. Phys. Lett.* 73, 262 (1998).
- 8) K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, Y. Oka, B. J. Vartanian, and J. S. Harris, Jr., *Appl. Phys. Lett.* 68, 34 (1996).
- 9) J. Shirakashi, K. Matsumoto, N. Miura, and M. Konagai, *Appl. Phys. Lett.* 72, 1893 (1998).
- 10) C. Nguyen, B. Brar, H. Kroemer, and J. English, *Appl. Phys. Lett.* 60, 1854 (1992).
- 11) R. R. Gerhardts, D. Weiss, and K. v. Klitzing, *Phys. Rev. Lett.* 62, 1173 (1989).
- 12) S. Sasa, A. Nakashima, T. Kita, and M. Inoue, *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 170*, 595 (2002).



佐々誠彦 (非会員)

1957年12月7日生まれ。80年大阪大学工学部電気工学科卒業。82年同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年富士通研究所入社。89年大阪大学より工学博士取得。89年から91年(1年6ヶ月)カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員。95年大阪工業大学助教授、2002年同教授、主として化合物半導体デバイスの研究に従事。応用物理学会、電気学会、米国物理学会会員。



中島貴史 (非会員)

1979年3月31日生まれ。2001年大阪工業大学大学院工学研究科電気電子専攻入学。主として、原子間力顕微鏡による陽極酸化を用いたナノスケール加工およびデバイス開発に関する研究に従事。応用物理学会会員。



井上正崇 (非会員)

1945年1月25日生まれ。73年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年大阪大学工学部助手。84年3月同助教授を退職。同年4月より大阪工業大学工学部助教授、86年4月同教授。79年から80年コーネル大学研究員。工学博士。これまで化合物半導体の電子・光物性とデバイス開発等の研究に従事。1997年-2000年、新材料研究センター長。2001年4月より教務部長。応用物理学会、日本物理学会、電子情報通信学会、米国物理学会会員。

(2002年10月11日受理)