

TR-O-0126

29

GaAs(111)A基板における成長前表面処理と
その表面状態の研究

平井 学

1996. 3.15

ATR光電波通信研究所

GaAs(111)A基板における成長前 表面処理とその表面状態の研究

A T R 光電波通信研究所
通信デバイス研究室

Manabu HIRAI

平井 学

目次	page
研究目的	1
概要	2
1. はじめに	3
2. 実験方法	4
3. 結果と考察	5
3.1 ウェットエッチング処理後の基板表面状態	5
3.2 熱クリーニング処理後の基板表面状態	6
3.3 ウェットエッチング処理における基板エッチングメカニズム	7
4. 結論	9
5. 引用文献	10
6. 図表	11

謝辞

付録

[研究目的]

本研究ではGaAs(111)A面上のMBE成長において良好な成長膜を得るために必要不可欠である成長前表面処理のうちウェットエッチング処理および熱クリーニング処理を取り上げ、基板処理後の表面状態を明らかにするとともに、(111)A面で代表される高指数面の持つ種々の特徴を活かした新しい高機能デバイス実現のために重要な基礎物性情報を得ることを目的とする。

[概要]

成長前表面処理のうちウェットエッチング処理および熱クリーニング処理を取り上げ、各処理後の基板表面状態についてAFMを用いて詳細に調べた。硫酸系エッチャントを用いた高指数面のウェットエッチング処理においては基板上の原子ステップ密度が高くなるにつれてエッチング処理後の基板表面上のAsに関する突起の数も増加した。一方、アンモニア系エッチャントを用いて処理した場合、突起の数と原子ステップ密度の間には硫酸系エッチャントで処理した場合に見られる関係は無かった。これらの結果は硫酸系エッチャントは原子ステップ上のGa原子を選択的に攻撃するためであり、また、アンモニア系エッチャントを用いた場合では基板表面の極性を反映してエッチングが進むためであると考えられる。熱クリーニング処理後の(111)A基板表面はクレーク上のAs抜けが見られるが、これらは熱クリーニング処理前の基板表面粗さと表面原子構造を考慮することにより説明できる。

1. はじめに

GaAs(111)A面は不純物のシリコン(Si)が両性不純物として振る舞う[1]、表面エネルギーが低く表面準位密度が小さい[2]、量子構造を作るとバント構造が急峻になり遷移確率が高くなるため発光効率が良くなる[3]、歪系を成長した場合にピエゾ効果により内部電界が発生する[4]、などの特徴を持っており、デバイス応用において非常に興味深い面方位である。しかしながら、この(111)A面の成長においては良好なGaAs成長膜が得られ難いという問題がある。

(001)基板の成長前処理に一般的に用いられる硫酸系エッチャント($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=5:1:1$)で処理した(111)A上のGaAs成長においてはピラミッド状のファセットが生成しやすく、成長膜の表面は非常に荒れるが、アンモニア系エッチャント($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$)でエッチング処理した(111)A基板上のGaAs成長はファセットの成長は見られるもののその密度は非常に低く、硫酸系エッチャントで処理した(111)Aに比べて良好なGaAs成長膜を得ることができる[5]。この様に成長膜の表面状態は成長する基板上の成長膜の成長メカニズムだけでなく成長前の基板の表面状態に大きく影響を受ける。したがって、良好な成長膜を得るためには成長前の基板の表面状態について十分に理解することが必要である。

今回、成長前処理のうちウェットエッチング処理及び熱クリーニング処理を取り上げ、各処理後の基板表面状態について詳細に調べた結果を報告する。

2. 実験方法

半絶縁性クロム酸素ドープのGaAs(111)A基板および(001)基板を以下の手順によりウエットエッチング処理した。

-ウエットエッチング処理手順-

1. H_2SO_4 系のエッチング

- ① アセトン超音波洗浄5分
- ② 純水洗浄5分
- ③ N_2 フロー
- ④ $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=5:1:1$
30°C, 1分
- ⑤ 純水洗浄5分
- ⑥ N_2 フロー

2. NH_4OH 系のエッチング

- ① アセトン超音波洗浄5分
- ② 純水洗浄5分
- ③ N_2 フロー
- ④ conc H_2SO_4 30秒
- ⑤ 純水洗浄5分
- ⑥ $NH_4OH:H_2O_2:H_2O=2:1:96$
22°C, 1分および5分
- ⑦ 純水洗浄5分
- ⑧ N_2 フロー

熱クリーニング処理はウエットエッチング処理した基板をULVAC NCS-2000S MBE装置の予備加熱室で250°C, 40分間予備加熱した後、成長室に搬送し 4.5×10^{-5} torrのAs圧下で行った。処理条件は630°Cおよび700°Cで各5分間である。

表面処理した基板表面の観察は原子間力顕微鏡 (AFM; Atomic Force Microscopy, SEIKO Instruments SPA300) のサイクリックコンタクトモードを用い、大気中で行った。また、エッチング処理した基板の表面状態を評価するためにフィールドエミッション型のオージェ電子分光装置 (FE-AES; Field Emission scanning Auger Electron Microprobe, PERKIN ERMER PHI-670 and VG MICROLAB 310-F) 及びX線光電子分光装置 (XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy, PERKIN ESMEER ESCA5400MC) を用いた。FE-AESのプローブ径はPERKIN ERMER製の装置で $\phi 40$ nm, VG製の装置で $\phi 20$ nmであり、測定対象物の大きさによって装置の使い分けを行った。XPS分析は励起X線源に14.0 kV, 300wのAl $K\alpha$ 線を用い、測定領域 $\phi 1$ mmで行った。なお、測定対象物の最表面の情報を得るために光電子の取り出し角度は10°とした。

3. 結果と考察

3.1 ウェットエッチング処理後の基板表面状態

硫酸系エッチャントとアンモニア系エッチャントを用いてエッチング処理した(111)Aおよび(001)基板表面のAFM観察像を図1に示す。AFMの走査領域は $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ である。図に示すようにアンモニア系エッチャントで処理した(111)Aと硫酸系エッチャントで処理した(001)の表面は滑らかであるが、一方、硫酸系(H_2SO_4 系)エッチャントで処理した(111)Aとアンモニア系(NH_4OH 系)エッチャントで処理した(001)の表面には突起が見られる。この突起はアンモニア系エッチャントで処理した(001)表面に比べ硫酸系エッチャントで処理した(111)A表面の方に多く観察され、エッチング処理時間を5分間にすると(001)表面では突起の数、大きさともに変化が見られないのに対し、(111)A表面では処理時間の増加に伴って突起は大きくなり、また、突起の数は増加した。

エッチング処理した基板表面上の突起の大きさを見積もるために、 $80\text{nm}\times 80\text{nm}$ の微小走査領域において、AFM観察を行った。図2のAFM観察像は硫酸系エッチャントで1分間処理した(111)A表面の突起を示している。図2から突起の大きさは直径 $20\sim 30\text{nm}$ 、高さ $2\sim 5\text{nm}$ であり、硫酸系エッチャントで1分間処理した(111)A表面とアンモニア系エッチャントで処理した(001)表面の突起の大きさは同じであった。また、硫酸系エッチャントで5分間処理した(111)A表面の突起の大きさは直径 $75\sim 100\text{nm}$ 、高さ $10\sim 20\text{nm}$ であった。

エッチング処理した表面の粗さを数値化して比較するために、各サンプルについて自乗平均面粗さ(RMS)を算出した(表1)。表1に示すように1分間エッチング処理した(001)の表面ではRMSの値に差は見られず、エッチング処理した(001)基板の表面粗さはエッチャントの種類に依存しないことが分かる。一方、エッチング処理した(111)A表面ではアンモニア系エッチャントで処理したサンプルに比べて、硫酸系エッチャントで処理したサンプルの方がRMSの値が大きくなっており、エッチングされた表面の粗さはエッチング処理に用いたエッチャント液に影響を受けることが分かる。

次に硫酸系エッチャントで処理した(111)A表面やアンモニア系エッチャントで処理した(001)表面で観察される突起について詳しく調べるために、オージェ電子分光法により、各サンプルの突起部と平坦部についてガリウムおよび砒素の組成の違いを調べた。図3に硫酸系エッチャントを用いて処理した(111)A表面の突起部と平坦部のオージェスペクトルを示す。図に示すように平坦部に対して突起部ではGaの $L_{2,3}$ 強度が小さく、逆にAsの $L_{2,3}$ 強度は大きくなっており、平坦部と突起部でガリウムと砒素の組成に違いがあることが分かる。Ga $L_{2,3}$ およびAs $L_{2,3}$ から求めた $L_{2,3}$ 強度の比(以降As/Ga比と表記する)を

表2にまとめる。表2に示すように硫酸系エッチャントで処理した(111)A表面およびアゾモニ7系エッチャントで処理した(001)表面ともに、平坦部に比べ突起部の方がAs/Ga比の値は大きい。したがって、突起部は平坦部に比べ相対的にAs量が多いことが分かる[6]。また、各サンプルの平坦部のAs/Ga比の値に着目すると、(111)Aサンプルおよび(001)サンプルともに処理エッチャントの違いによる差は見られない。したがって、硫酸系エッチャントで処理した(111)Aもアゾモニ7系エッチャントで処理した(001)も表面に突起は見られるものの、それぞれの平坦部では表面状態は維持されていることが分かる。

3.2 熱クリーニング処理後の基板表面状態

630°Cで5分間及び700°Cで5分間の2条件においてウェットエッチング処理後のサンプルの熱クリーニング処理を行った。図4に各条件において熱クリーニング処理を行ったサンプル表面のAFM像を示す。AFMの走査範囲については630°Cで処理したサンプルは1 μm ×1 μm であり、700°Cで処理したサンプルは2.5 μm ×2.5 μm とした。なお、熱クリーニング処理により発生したAs抜けに起因する穴の深さはAFM像から求めた(表3)。図に示すように630°Cで熱クリーニング処理を行った(111)A基板表面の状態は(001)基板表面と異なり、As抜けに起因した穴が見られない。さらに、(001)サンプルではアゾモニ7系エッチャントで処理したサンプルと硫酸系で処理したサンプルでAs抜けに起因する穴の数及び深さともに差は見られない。一方、700°Cで熱クリーニング処理を行ったサンプルでは(111)A基板表面のAs抜けに起因する穴の数が(001)基板表面に比べて少なく、また、(111)A、(001)サンプルともに硫酸系エッチャントで処理したサンプルに比べてアゾモニ7系エッチャントで処理したサンプルの方がAs抜けに起因する穴の数が少なく、深さも浅い。これらの結果から熱クリーニング処理後の基板表面の状態は基板面方位に依存し、また、熱クリーニング処理前の基板表面の状態に影響を受けると考えられる。

ウェットエッチング処理後の表面粗さと熱クリーニング処理後の表面粗さの関係を更に詳しく調べるために、各サンプルについて自乗平均面粗さ(RMS)を求めた(図5)。図中に示すように630°Cで熱クリーニング処理した(111)Aではアゾモニ7系エッチャントで処理したサンプルに比べ硫酸系エッチャントで処理したサンプルのRMSの値の変化が大きい。これは硫酸系エッチャントで処理した(111)Aサンプルの熱クリーニング前の表面がアゾモニ7系エッチャントで処理したサンプルに比べて荒れているためにAs抜けの原因となる基板表面上の原子ステップ(※原子ステップ上のAs原子はダングリングボンドを持つため、Ga原子に取り囲まれているAs原子に比べて不安定である)の数がアゾモニ7系エッチャントで処理したサンプルに比べて多くなる

ことが原因であると考えられる。一方、700°Cの熱クリーニング処理においては処理前の表面状態に関係なく(111)Aサツプルに比べ(001)サツプルのRMSの値の変化が大きくなっている。これは700°Cの熱クリーニング処理において、As原子に与えられるエネルギーがGa原子に取り囲まれて格子点位置にありステップ上のAs原子より安定なAs原子をそこから脱離させるのに十分な量であるため、特にアンモニア系エッチャントで処理した(111)A面と(001)面で見られる様に表面からのAs抜け状態が異なるのは基板表面の原子構造が異なるためであると考えられる(図4)。

図6に(111)A表面および(001)表面の原子構造の断面模式図を示す。図に示すように(111)A表面ではaのAs原子は上層のGa原子と3本の結合手(A₁)で結合し、下層のGa原子と1本の結合手(A₂)で結合している。(001)表面ではcのAs原子は上層および下層のGa原子とそれぞれ2本の結合手(B₂およびB₃)で結合している。aおよびbの位置にあるAs原子が700°Cの熱クリーニング処理によりその格子位置から脱離する時、(001)面ではB₁の結合のうちの1本の結合が切れるとcのAs原子はB₁の結合が切れる前のbのAs原子と同様の状態になるのでB₂の結合が切れる方向(基板側方向)にAs抜けが進行すると考えられる。したがってそのAs抜けにより多くの穴が発生する。しかしながら、(111)A表面ではA₂に比べてA₁の結合の方が安定であるためA₂の結合が切れるとA₁よりもむしろA₃の結合が切れる方向にAs抜けが進行すると考えられる。したがって熱クリーニング処理前のサツプル表面のRMSの値が0.24nmに近く[7]、非常に平坦である場合は図4のアンモニア系エッチャントで処理した(111)Aサツプルの様にAs抜けはクレータ状に起こり、穴の深さも浅くなる。

700°Cで熱クリーニング処理した(001)サツプルのRMSの値の変化はアンモニア系エッチャントで処理したサツプルに比べて硫酸系エッチャントで処理したサツプルの方が大きい。この現象は700°Cの熱クリーニング処理後の(001)サツプルの表面粗さが熱クリーニング前の表面粗さに影響を受けないということで非常に興味深いが、本報告では高指数面の基礎物性の解明に重点を置いているため(001)面に関してこれ以上の検討は行わない。

3.3 ウェットエッチング処理における基板エッチングメカニズム

(110)面から(001)面までの9種類の基板を硫酸系エッチャントおよびアンモニア系エッチャントを用いてウェットエッチング処理し、処理後の基板表面のAFM観察像から基板表面上のAsに関する突起の数を調べた。AFMの走査領域は5μm×5μmである。図7に(111)Aからの斜角度に対する基板表面上のAsに関する突起の数を示す。硫酸系エッチャントで処理し

た各基板上の突起の数と図中の点線で表された各基板上の原子ステップ密度の間には相関が見られ、原子ステップ密度が高くなると突起の数も増加している。したがって、ウェットエッチング処理後の基板表面上の突起がAs過剰の組成を持つことを考慮すると、硫酸系エッチャントを用いた場合、原子ステップ上のGa原子が選択的に攻撃されることが分かる。一方、アモニア系エッチャントで処理した各基板上の突起の数と各基板上の原子ステップ密度の間には相関が見られない。

ここで、アモニア系エッチャントを用いて処理した場合の基板表面状態の変化をさらに詳しく調べるために、ウェットエッチング処理後の基板表面上に突起が観察される(110)基板と(001)基板を選び、XPS分析により得られたGa2pスเปクトルおよびAs2pスเปクトルの積分強度からエッチング処理後の基板表面のAs原子数とGa原子数の割合を見積もった(表4)。表4の値を用いて算出した各処理後の基板表面のAs/Ga原子数比を図8に示す。未処理基板の表面に比べ(110)基板、(001)基板ともに各処理後の基板表面のAs/Ga原子数比の値が大きくなっており、総てのウェットエッチング処理で基板表面はAs過剰の組成になっていることが分かる。しかしながら、(111)A基板表面では硫酸による処理でAs過剰の組成になり、その後アモニア系エッチャントによる処理によりAs/Ga原子数比の値はほぼ1になることが報告されている[8]。したがって硫酸を用いた処理においてはGa原子が選択的に攻撃されるが、その後のアモニア系エッチャントを用いた処理では基板表面の極性に反映してエッチングが進むと考えられる。

(110)面と(001)面でウェットエッチング処理後の基板表面上の突起の数が違うのは各基板表面の原子配置を考慮することにより理解できる。同一平面上の原子配置を考えた場合、(001)面ではあるGa原子の最近接のGa原子は4つあるが(110)面では2つ((111)A面では6つ)であるため、単位面積あたりの原子密度は(110)面よりも(001)面の方が高くなる。したがって、(001)基板表面に比べて(110)基板表面のGa原子の方が攻撃されやすく、そのため(110)基板表面上でAsに関する突起の数が多くなると考えられる。

4. 結論

良好な成長膜を得るために必要不可欠である成長前表面処理のうちウエットエッチング処理および熱クリーニング処理を取り上げ、各処理後の基板表面状態についてAFMを用いて詳細に調べた。硫酸系エッチャントを用いた高指数面のウエットエッチング処理においては基板上の原子ステップ密度が高くなるにつれてエッチング処理後の基板表面上のAsに関する突起の数も増加した。一方、アンモニア系エッチャントを用いて処理した場合、突起の数と原子ステップ密度の間には硫酸系エッチャントで処理した場合に見られる関係は無かった。これらの結果は硫酸系エッチャントは原子ステップ上のGa原子を選択的に攻撃するためであり、また、アンモニア系エッチャントを用いた場合では基板表面の極性を反映してエッチングが進むためであると考えられる。熱クリーニング処理後の(111)A基板表面はクレータ上のAs抜けが見られるが、これらは熱クリーニング処理前の基板表面粗さと表面原子構造を考慮することにより説明できる。

5. 引用文献

- [1] W. I. Wang, E. E. Mendez, T. S. Kuan and L. Esaki, Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 826.
- [2] S. Sabbanna, H. Kroemer and J. L. Merz, J. Appl. Phys. 59 (1986) 488.
- [3] T. Hayakawa, K. Takahashi, M. Kondo, T. Suyama, S. Yamamoto and T. Hijikata, Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 349.
- [4] D. L. Smith and C. Mailhot, Rev. Mod. Phys. 62 (1990) 173.
- [5] T. Yamamoto, M. Inai, T. Takebe and T. Watanabe, J. Vac. Sci. & Technol. A11 (1993) 631.
- [6] 突起部のオージェ電子分光分析においてはArイオンエッチング後でも酸素は殆ど検出され無かったことから、突起部は酸化物の塊ではないと考えられる。
- [7] 最適化された成長条件のもとでGaAs(001)面上に100nmのGaAs膜をMBE成長したときの、GaAs膜表面のRMSは0.24nmとなる。
Y. Nomura, S. Goto and Y. Morishita, Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L1744.
- [8] 山本悌二, 稲井誠, ATR Technical Report TR-0-0084.

6. 図表

表1 エッチング処理した基板表面の自乗平均面粗さ* (RMS)

基板面方位	H ₂ SO ₄ 系エッチャント		NH ₄ OH系エッチャント	
	処理1分	処理5分	処理1分	処理5分
(111)A	0.57	3.26	0.23	-
(001)	0.22	-	0.24	0.29

*付録1参照

表2 Gat°-クおよびAst°-クから求めたヒ°-ク強度の比

基板面方位	H ₂ SO ₄ 系エッチャント		NH ₄ OH系エッチャント	
	平坦部	突起部	平坦部	突起部
(111)A	1.2	3.0	1.2	-
(001)	1.4	-	1.4	2.9

※表中の値はAst°-ク強度/Gat°-ク強度を示している

表3 各熱クリーニング処理温度におけるAs抜けに起因する穴の深さ

基板面方位	エッチャント	熱処理温度	
		630℃	700℃
(111)A	H ₂ SO ₄ 系	-	~10
(111)A	NH ₄ OH系	-	~2
(001)	H ₂ SO ₄ 系	~2	~10
(001)	NH ₄ OH系	~3	~6

表4 XPS分析により得られたGa2pスเปクトルおよびAs2pスเปクトルの積分強度から求めたGa原子数およびAs原子数の割合(数値はAs atom%/Ga atom%を表す)

※各処理における基板面方位依存性を評価するために表中の数値はAr⁺スパッタエッチング処理により15nmエッチングした表面のGa及びAsの原子数比が1:1であるとして補正された感度係数を用いて算出した(感度係数補正前の値は付録2参照のこと)

基板面方位	基板処理条件				
	未処理	H ₂ SO ₄ ¹⁾	NH ₄ OH ²⁾	H ₂ SO ₄ +NH ₄ OH ³⁾	Ar ⁺ エッチング ⁴⁾
(001)	40.3/59.7	52.6/47.4	57.1/42.9	54.9/45.1	50.0/50.0
(110)	29.1/70.9	52.9/47.1	65.7/34.3	69.4/30.6	50.0/50.0

1)濃硫酸で30秒間処理, 2)NH₄OH系エッチャントで1分間処理, 3)濃硫酸で30秒間処理した後、NH₄OH系エッチャントで1分間処理, 4)Ar⁺スパッタエッチング処理(エッチング深さ:15nm)

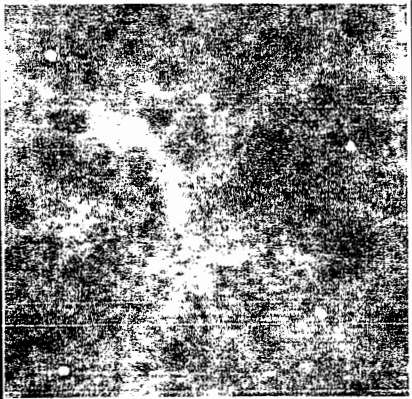
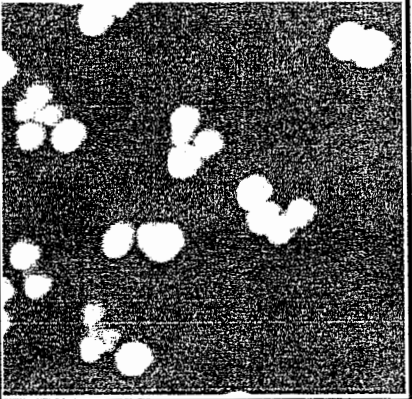
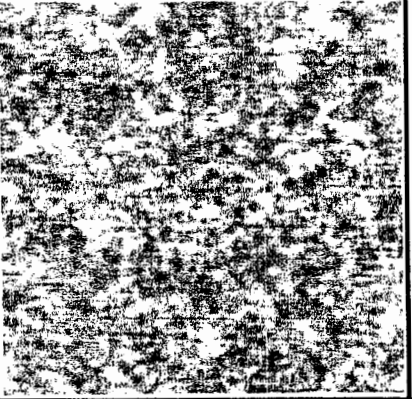
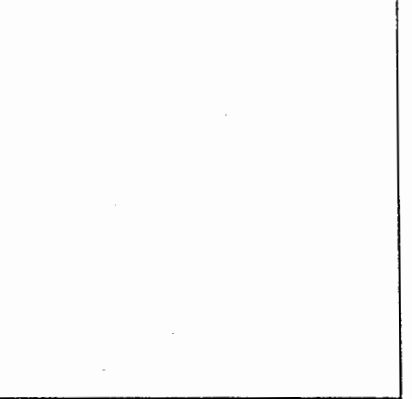
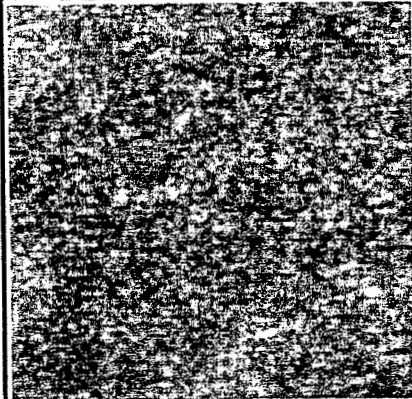
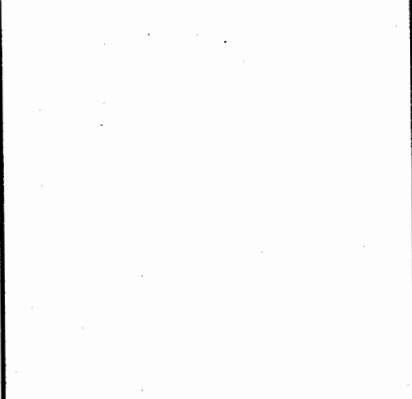
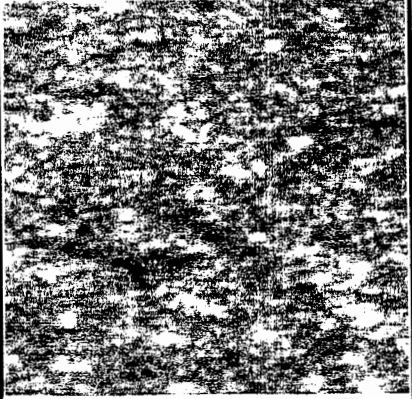
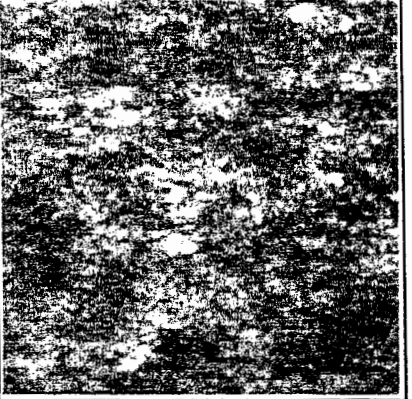
		H ₂ SO ₄ 系		NH ₄ OH系	
		処理 1 分	処理 5 分	処理 1 分	処理 5 分
(111)A					
(001)					

図1 エッチング処理したサンプル表面のAFM像 (測定領域: 1 μ m \times 1 μ m)

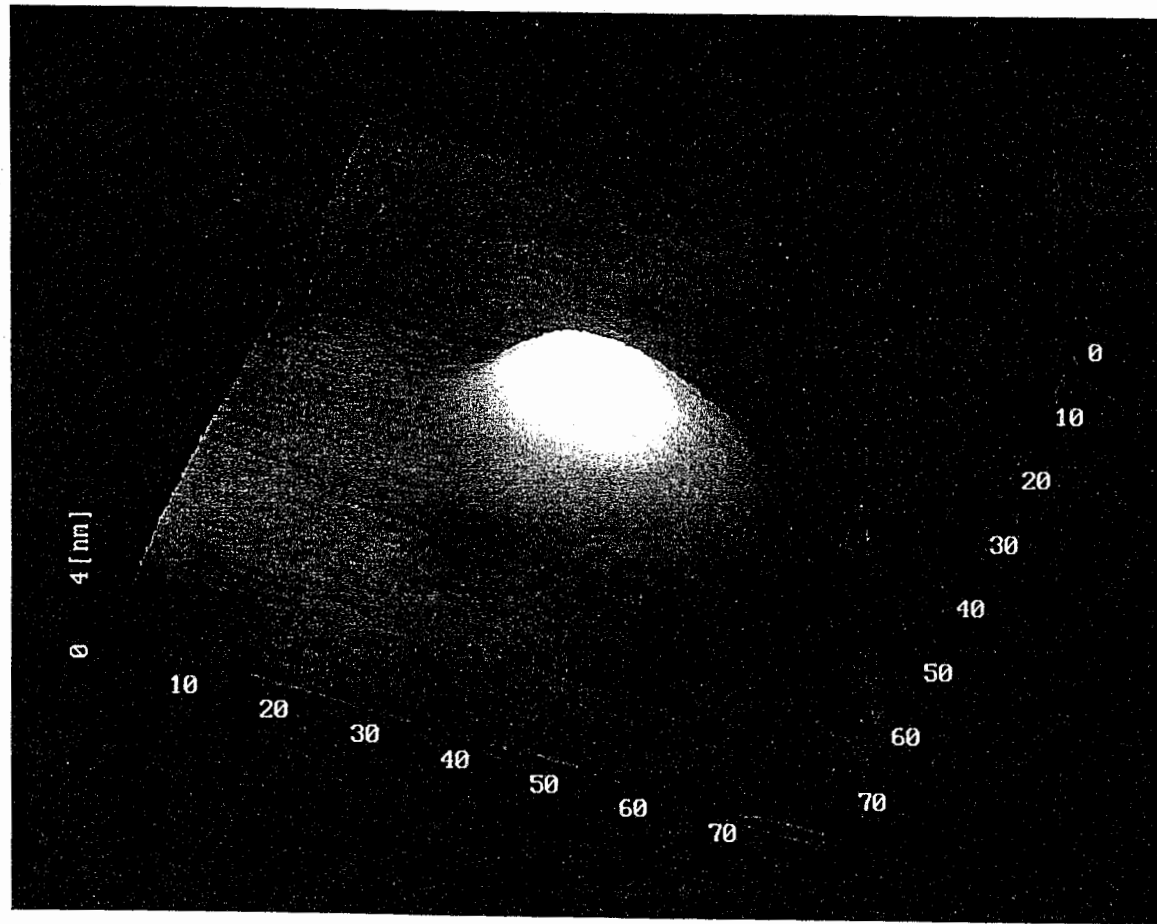


図2 硫酸系エッチャントで処理した(111)A基板表面のAFM像 (測定領域：80nm×80nm)

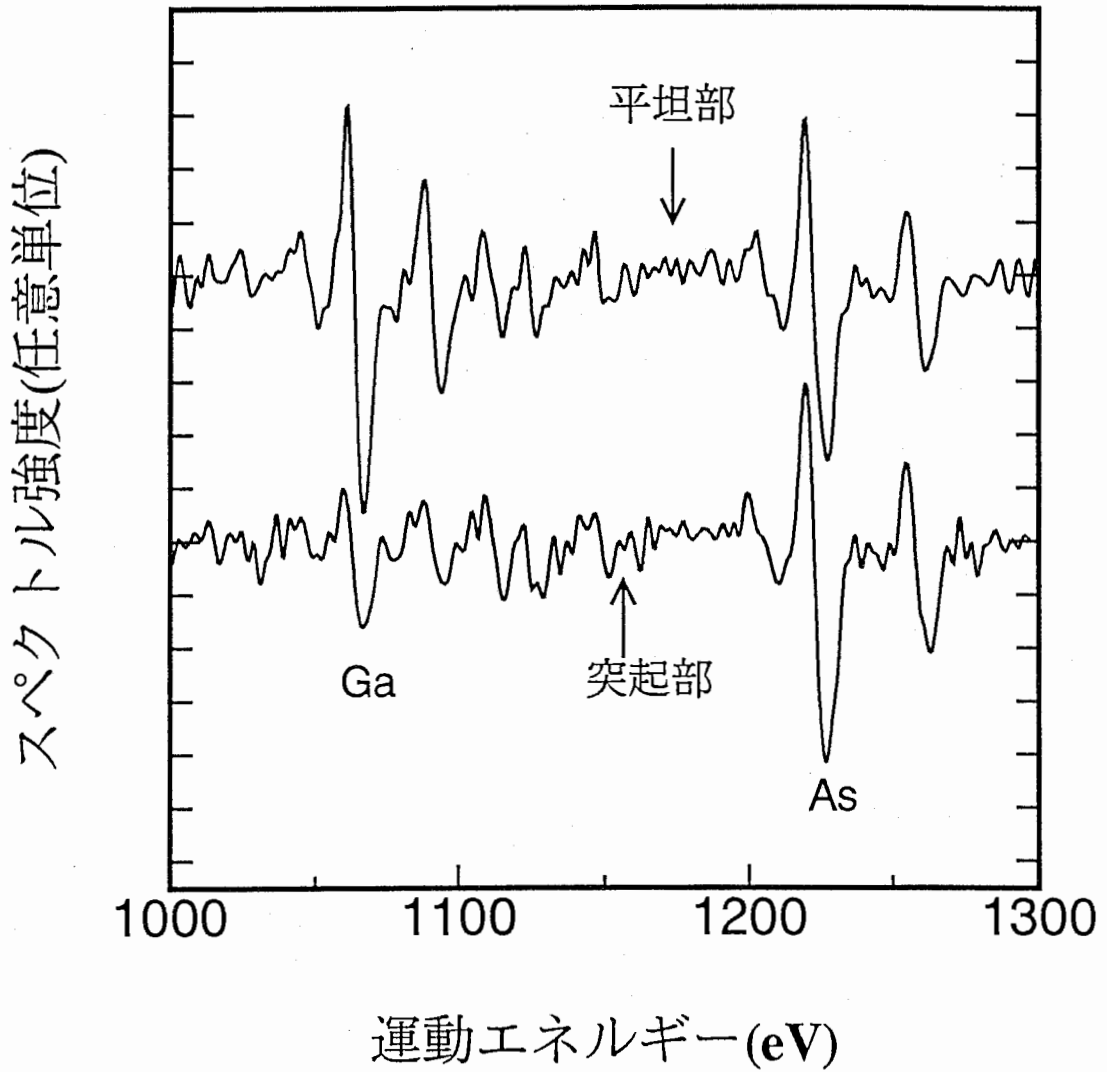


図3 硫酸系エッチャントを用いて処理した(111)A表面の突起部と平坦部のオージェスペクトル; 図中のGa, Asは検出されるGa及びAsのピーク位置を示している

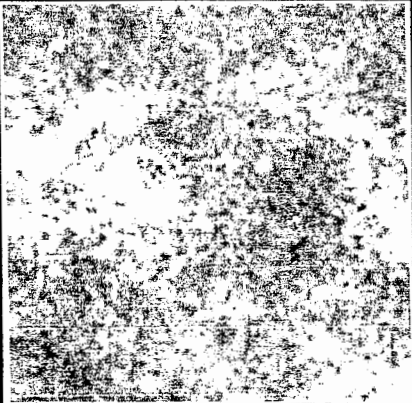
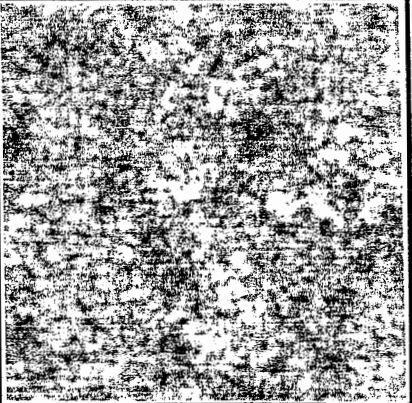
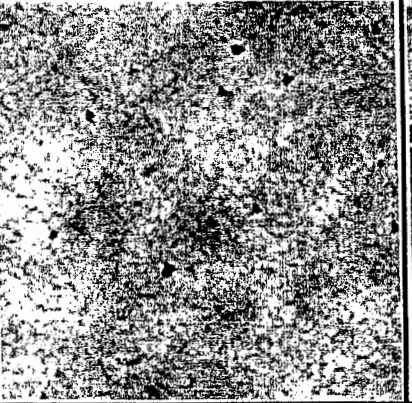
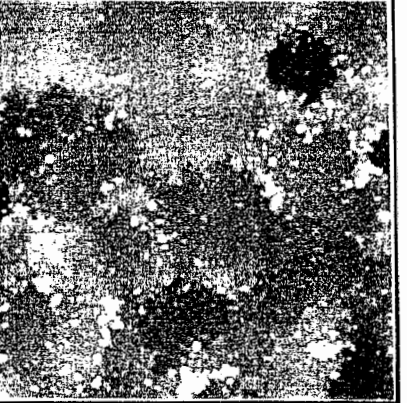
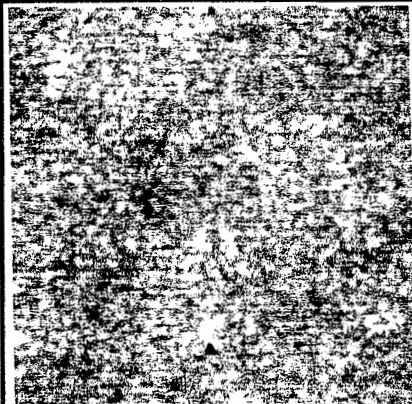
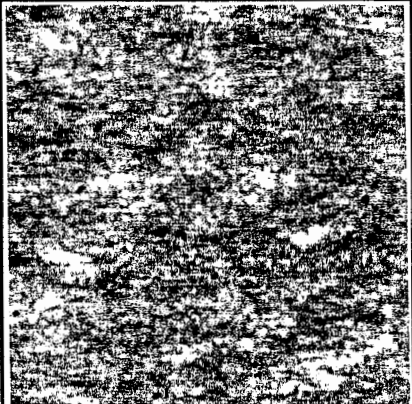
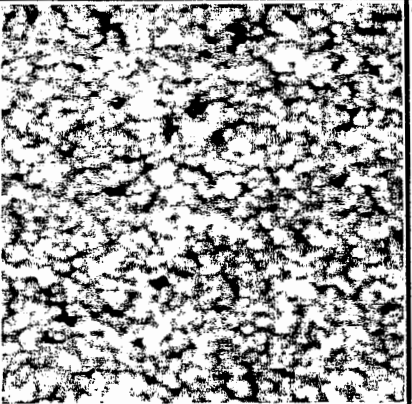
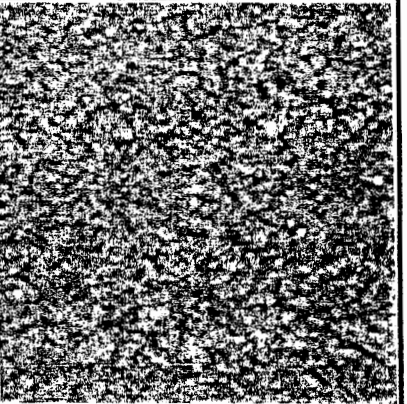
		630°C 熱クリーニング 処理		700°C 熱クリーニング 処理	
		H ₂ SO ₄ 系	NH ₄ OH系	H ₂ SO ₄ 系	NH ₄ OH系
(111)A					
(001)					

図4 熱クリーニング処理したサンプル表面のAFM像 (630°Cで処理したサンプルの測定領域は1 μ m \times 1 μ m, 700°Cで処理したサンプルの測定領域は2.5 μ m \times 2.5 μ m)

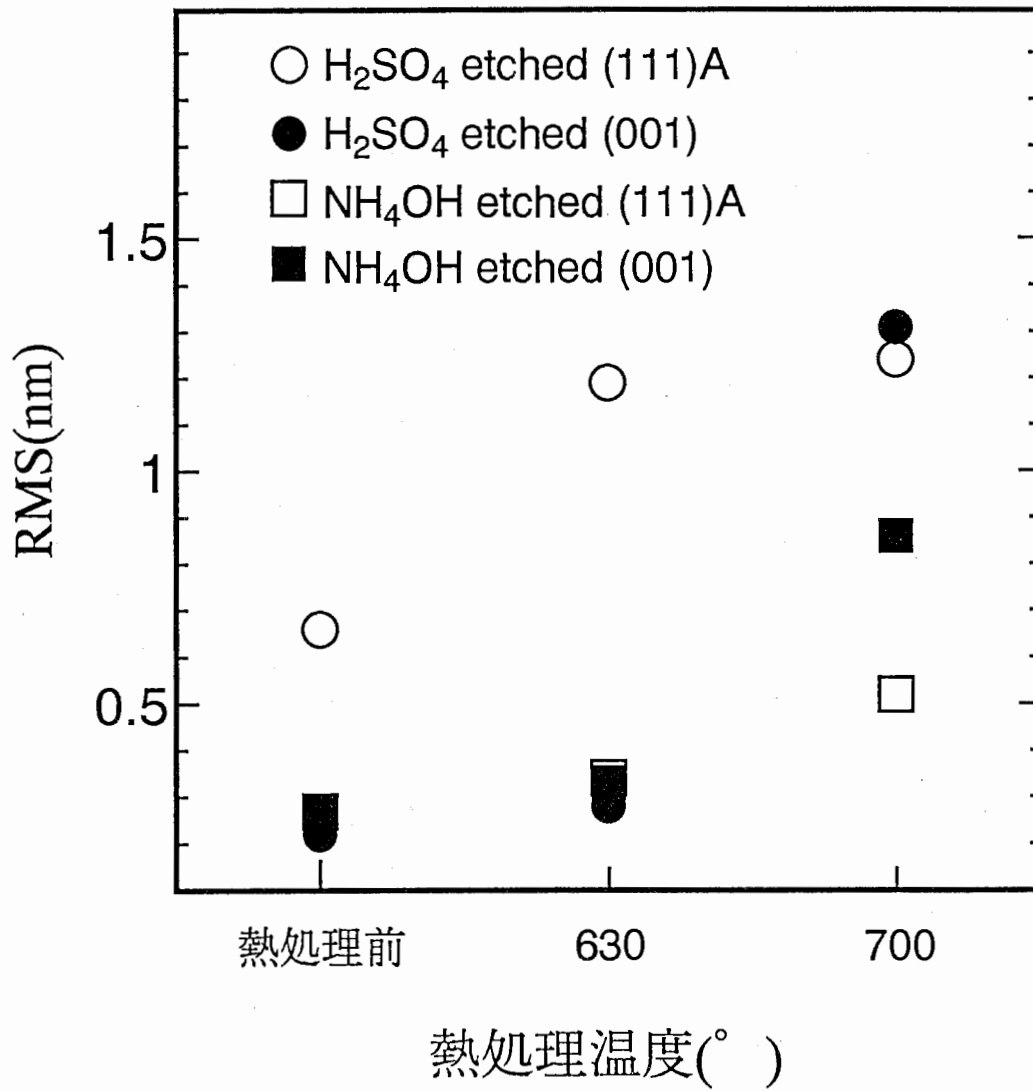
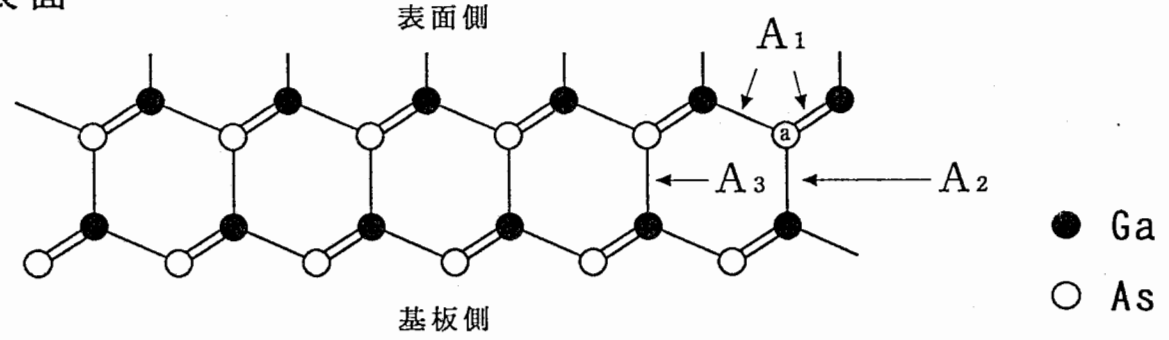


図5 基板表面の自乗平均面粗さと熱クリーニング温度の関係

a) (111)A表面



b) (001)表面

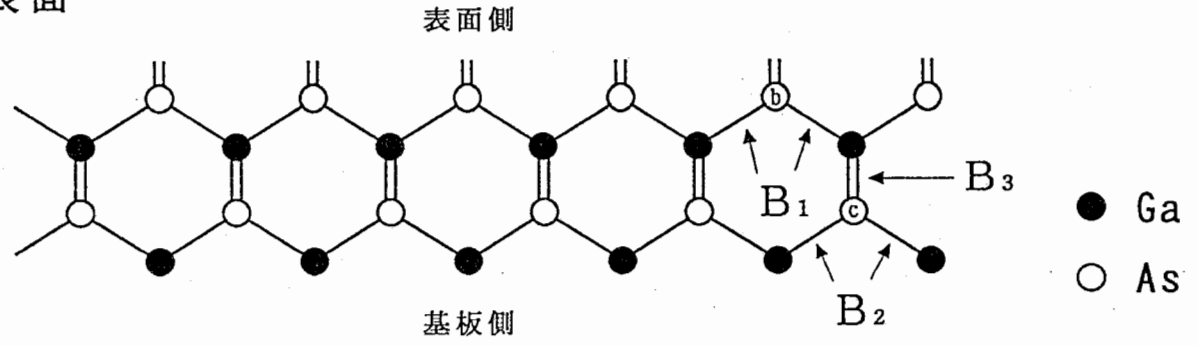


図6 (111)A表面および(001)表面の原子構造 (断面模式図)

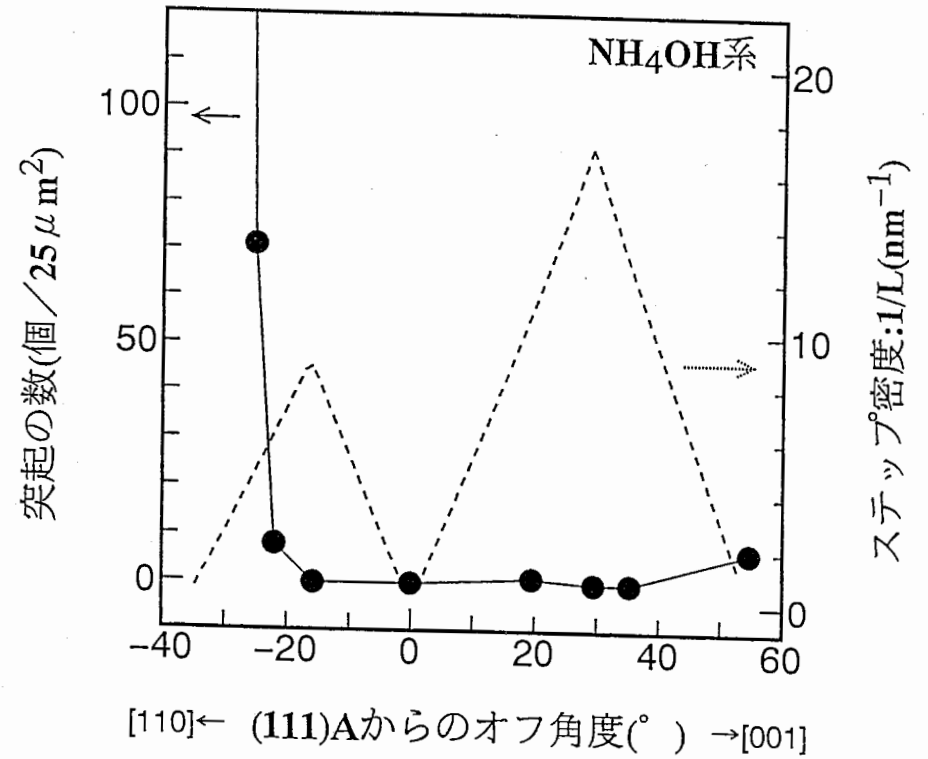
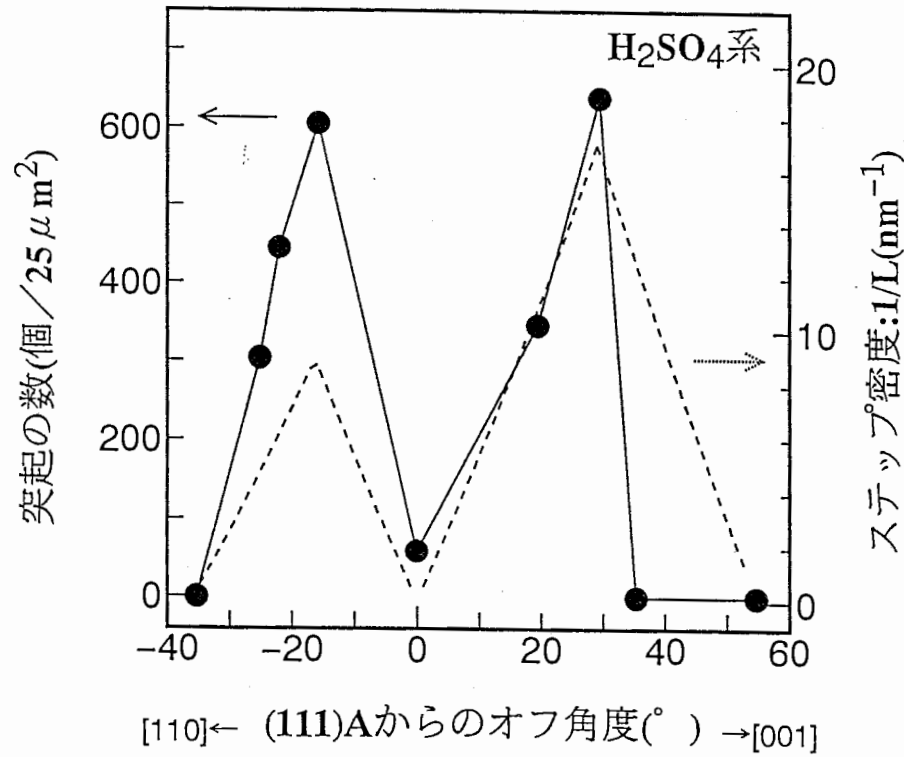


図7 エッチング処理した基板上的突起の数及び原子ステップ密度の基板面方位依存性

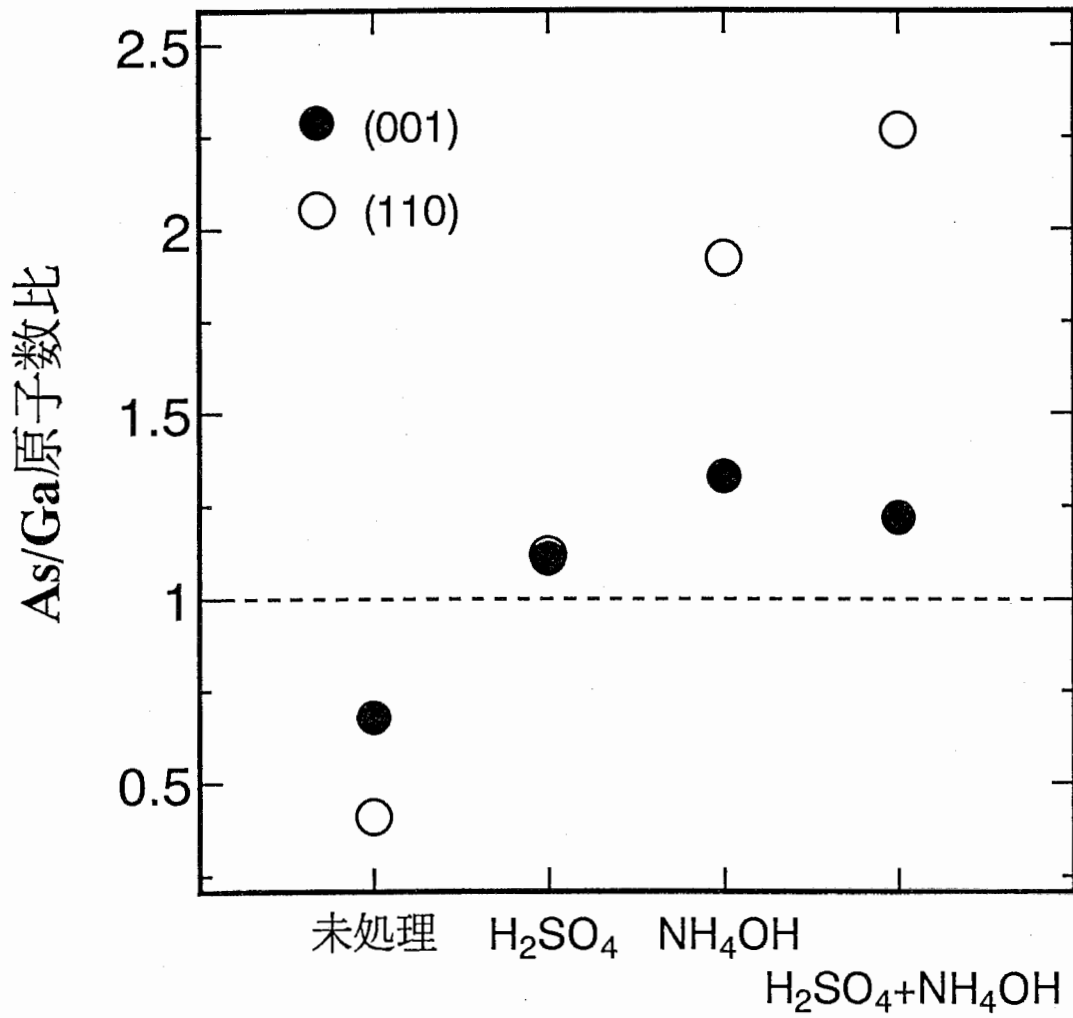


図8 XPS分析により得られたGaおよびAsスペクトルの積分強度から求めたAs/Ga原子数比（表4の値を用いて算出した）

謝辞

日頃よりこの研究をご指導頂いているATR光電波通信研究所猪股英行社長、渡辺敏英室長に深く感謝いたします。研究全般にわたりサンプル作製を手伝っていただき、また、有意義な討論をしていただいた大西一研究員に深く感謝いたします。本研究を行うにあたり有意義な助言をいただいた藤田和久主任研究員に深く感謝いたします。本研究所での研究の機会を与えていただいた(株)村田製作所山本宏氏に深く感謝いたします。また、オージェ電子分光分析、X線光電子分光分析の測定およびデータ解析でお世話になった(株)村田製作所藤原敏伸氏、岩永俊之氏、尾山貴司氏に深く感謝します。

付録1 -自乗平均面粗さ-

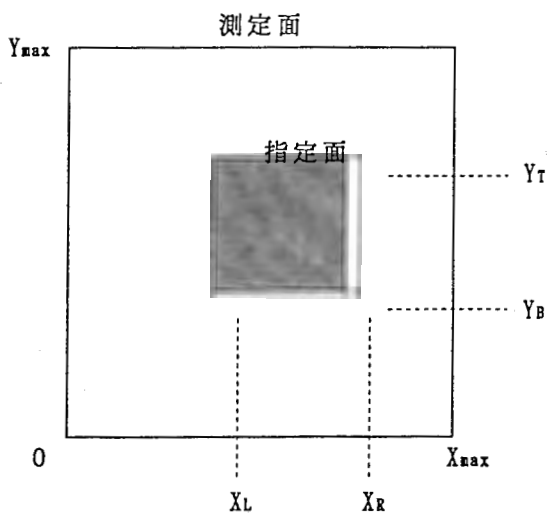


図 測定面と指定面

図の様に(X, Y)が(0, 0)-(X_{max}, Y_{max})の範囲を持つときZ=F(X, Y)で表される面を測定面とし、その中で範囲(X_L, Y_B)-(X_R, Y_T)を持ち、粗さ計測の対象となる面を指定面とする。

指定面が理想的にフラットであるとしたときの面積S₀は

$$S_0 = (X_R - X_L) \cdot (Y_T - Y_B)$$

で表され、指定面の高さの平均値となる基準面Z₀は

$$Z_0 = 1/S_0 \int_{Y_B}^{Y_T} \int_{X_L}^{X_R} F(X, Y) dXdY$$

で求められる。

RMSは基準面から指定面までの偏差の自乗を平均した値の平方根であるから、次式のように表される。

$$RMS = [1/S_0 \int_{Y_B}^{Y_T} \int_{X_L}^{X_R} \{F(X, Y) - Z_0\}^2 dXdY]^{1/2}$$

付録2 -XPS分析により得られたGa2pスเปクトルおよびAs2pスเปクトルの積分強度から求めたGa原子数およびAs原子数の割合(数値はAs atom%/Ga atom%を表す)-

基板面方位	基板処理条件				
	未処理	H ₂ SO ₄ ¹⁾	NH ₄ OH ²⁾	H ₂ SO ₄ +NH ₄ OH ³⁾	Ar ⁺ エッチング ⁴⁾
(001)	45.4/54.6	57.8/42.2	62.2/37.8	60.0/40.0	55.2/44.8
(110)	33.0/67.0	57.4/42.6	69.7/30.3	73.2/26.8	54.6/45.4

1)濃硫酸で30秒間処理, 2)NH₄OH系エッチャントで1分間処理, 3)濃硫酸で30秒間処理した後、NH₄OH系エッチャントで1分間処理, 4)Ar⁺スパッタエッチング処理(エッチング深さ:15nm)