真空一貫プロセスによる GaAs の *in situ* 電子ビームリソグラフィ

杉本 喜正***・河西 秀典*・石川 知則*

(受付1991年12月5日, 掲載決定1992年3月7日)

In Situ Electron-Beam Lithography of GaAs Using UHV Multichamber System

Yoshimasa SUGIMOTO, Hidenori KAWANISHI and Tomonori ISHIKAWA

(Optoelectronics Technology Research Laboratory, 5-5 Tohkodai, Tsukuba, Ibaraki 300-26)

(Received December 5, 1991, Accepted March 7, 1992)

1. はじめに

量子細線, 量子箱等の極微構造を積極的に利用した素子が将来の電子, 光素子として注目を集め, 精力的に研究が進められている¹⁾. この様な極微構造を作成する微細加工方法として従来から行われているのが, 有機レジストとドライエッチングあるいは溶液でのエッチングを組み合わせたものがある. しかしこの方法では表面汚染等の問題があり, 埋め込み構造を作るときに再成長界面に不純物等が残る素子特性の劣化を招くことがある. 他の方法として, 集束イオンビーム (FIB) を用いた加工技術がある²⁻⁹⁾. この方法はマスクレス加工が可能であり, 又他のプロセス装置, たとえば分子線結晶成長装置 (MBE) 等との結合が可能であり *in situ* での加工, 成長プロセスができ表面汚染等の無い埋め込み構造を形成できる可能性がある¹⁰⁾. しかしイオン照射による表面近傍への損傷の導入は避けられず, その結果キャリアの移動度は低下し, 発光効率も低下することから素子特性に大きな影響を与える^{6, 7)}.

そこでイオンの代わりに電子を用いる新しい *in situ* プロセスを提案した. これは GaAs の酸化膜をレジストとして用いる新しい電子ビーム (EB) リソグラフィであり, 全工程を真空中あるいは高純度なガス中で行えるこ

とから, “*in situ* EB リソグラフィ”¹¹⁻¹⁶⁾と呼んでいる. このプロセスでは酸化膜レジストを EB アシスト Cl_2 エッチングにより直接パターンニングし, 下地の GaAs へは, 塩素ガスエッチングによりパターン転写する. エッチング終了後酸化膜レジストは, As 圧下での熱処理によって除去される. 更にパターン形成した基板の上に再度結晶成長する事も可能である.

この方法の利点は,

- (1) 超高真空 (UHV) 雰囲気の基本としたプロセスのため表面汚染の影響がない.
- (2) イオンの代わりに電子を用いている為損傷のない加工が期待できる.
- (3) 電子ビームのビーム径と同程度のサイズ (<10 nm) の微細加工が期待できる.

の様な事が挙げられる. 化合物半導体の場合は, Si 材料と異なり表面に非常に敏感な材料である. 従って, 清浄な雰囲気下でのプロセスが不可欠となる. 真空一貫プロセスの場合, 結晶成長によって得られた清浄表面を O, C に曝す事無く加工, さらに再成長というプロセスが 10^{-10} Torr 台という UHV 中で行える事から, 量子細線等, 特に表面に敏感な構造を実現する上で有効であると考えられる. 又, 荷電粒子の照射損傷という面でも Si 材料のようにアニールによって回復する事は不可能であり, 加工の時点で損傷の無い加工技術が必要と考え. 以上のような問題を解決する技術として *in situ* EB リソグラフィを検討した.

以下この新しいプロセス技術に関して以下の構成で説

* 光技術研究開発(株)つくば研究所 (〒300-26 茨城県つくば市東光台 5-5)

** 現在, 日本電気光エレクトロニクス研究所 (〒305 茨城県つくば市御幸が丘34番地)

図1 *In situ* EB リソグラフィのプロセス工程図。
ポジ型とネガ型の両方を示している。

明する。最初に *in situ* EB リソグラフィの原理，概念について述べ，次にこのプロセスを行うための真空一貫マルチチャンバーシステムに関して紹介する。そしてこの手法を用いてパターン形成を行った結果をポジ型（EB 照射領域がエッチングされる）とネガ型（EB 照射領域がエッチングされずに残る）に分けてそれぞれの実例について説明する。

2. *In situ* EB リソグラフィの原理とプロセス工程

In situ EB リソグラフィの原理は GaAs 酸化膜をレジストマスクと見立ててこの酸化膜マスクを電子ビームと塩素ガスを同時照射により除去（ポジ型）あるいは，電子ビームと酸素ガスとの同時照射して局所的に酸化膜マスクを形成する（ネガ型）ことである。この様にして形成したパターンをもとに塩素ガスエッチングにより下地の GaAs へパターン転写することで加工を実現する。

図1にプロセスの工程を示す。ここでは，ポジ型とネガ型に分けて描いている。ポジ型の場合，工程は5段階からなる。

- ① GaAs の清浄表面を作る。
- ② 光酸化により GaAs 表面にレジストマスクを形成する。
- ③ EB アシスト Cl_2 エッチングにより酸化膜レジストを直接パターンニングする。
- ④ 下地の GaAs に塩素ガスエッチングによりパターン転写する。
- ⑤ As 雰囲気下での熱処理により酸化膜レジストを除去する。

ネガ型のプロセス工程もポジ型とほぼ同様であるが，相違点は酸化膜レジストの形成方法である。この場合，EB 照射酸化膜をネガ型のレジストマスクとして用いている。これらの工程は試料表面を大気に曝すことなく全て UHV の環境下で行われる。更にパターン形成した基板上に再成長することも可能である。

図2 真空一貫マルチチャンバーシステム

3. *In situ* プロセスシステム

3.1 真空一貫 UHV マルチチャンバーシステム

In situ EB リソグラフィを行うために図2に示すような真空一貫マルチチャンバーシステム¹⁷⁾を用いた。このシステムは7つのチャンバー（エッチング室，MBE 室，試料前処理室，表面処理室，試料交換室，分析室，試料導入室）からなる。それぞれのチャンバーは真空の通路を介して試料交換室に星型に接続されている。到達真空度は試料導入室を除いて 10^{-9} Torr 以下である。エッチング室と表面処理室はイオンポンプ（SIP）とターボ分子ポンプ（TMP）で排気され，試料導入室は TMP のみで排気，他のチャンバーは SIP で排気されている。エッチング室のガス配管系や，排気系は塩素ガスによる腐食を防ぐための処理を施している。

エッチング室には EB ガンとガス導入システムが，又分析室にはオージェ分析用の CMA 型スペクトロメータが装着されている。MBE は固体ソースの標準的な装置であり，Ga, Al, As, Si, Be のセルが装備されている。全てのチャンバーは空気バネを用いた除振台に乗っており，床からの振動を除去することができる構造となっている。

3.2 EB 励起プロセス装置

図3はエッチング室の模式図である。チャンバーの上部には加速電圧10 kV の EB ガンカラムがある。このカラムは，エミッターを塩素ガスによる腐食から保護するため差動排気されている。エミッターは ZrO/W の熱電界放射陰極を用いている。ビーム径は約100 nm，試料電流は数百 pA 程度である。塩素或いは，酸素ガスはバリアブルリークバルブで制御し，細いステンレスのノズルから基板表面近傍に導入する。この方法により基板表面は高濃度なガスに曝されるが，チャンバー全体としては高真空を保つことが可能となる。基板温度は試料台に設けられたヒータにより制御することができる。任意の

図3 EB 励起プロセスを行う装置.

パターンを描画するためにコンピュータ制御されたパターンジェネレータが付属している。

4. ポジ型 *in situ* EB リソグラフィ

4.1 GaAs 酸化膜のマスク効果

先に述べたようにポジ型のパターン形成は電子ビームと塩素ガスを同時に照射して局所的に酸化膜を除去する手法を用いている。従って、その前提として酸化膜マスクは電子ビーム照射領域の外側、即ち塩素ガスのみの照射ではエッチングされないことが必要となる。このGaAs 酸化膜の塩素ガスに対する耐性は *in situ* EB リソグラフィプロセスの中では大きなウェイトを占める。

このことを確認する目的で4種類の異なる酸化条件の試料に対して塩素ガスエッチングを行いその耐性を調べた。光酸化は表面処理室でハロゲンランプの白色光を用い、基板温度は室温、酸素の圧力は1気圧一定として行った。その後エッチング室に試料を搬送し、塩素ガスエッチングを基板温度70°C、塩素フラックスは 7×10^{16} 分子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)のもとで行った。図4にエッチング深さとエッチング時間との関係を示す。試料OR-0(自然酸化:光照射無し)、OR-1(光酸化35 mW/ cm^2 , 10分)の場合はエッチング時間に対してエッチング深さが増加する。それに対して、OR-3(光酸化35 mW/ cm^2 , 60分)、OR-4(光酸化35 mW/ cm^2 , 840分)の場合はエッチングが起こらなかった。これらの結果から、35 mW/ cm^2 の光照射のもとで 3×10^{12} L (1L = 10^{-6} Torr·sec)以上の酸素を照射することにより塩素ガスエッチングに耐える酸化膜が形成できることが分かった。

4.2 GaAs 酸化膜のパターニング

光酸化膜を形成した後、試料は真空中を搬送されエッチング室に移される。そこで酸化膜レジストのEBアシスト Cl_2 エッチングによるパターン形成を行う。

酸素圧力1気圧、35 mW/ cm^2 の光照射、1時間で酸化膜を形成した試料に電子ビームと塩素ガスを同時に照射してパターンを形成し、酸化膜のパターニング条件を

sample No.	illumination	time	exposure
OR - 0	dark	60 min	3×10^{12} L
OR - 1	35 (mW/ cm^2)	10	5×10^{11} L
OR - 2	35	60	3×10^{12} L
OR - 3	35	840	4×10^{13} L

図4 GaAs 酸化膜の耐塩素ガス特性

図5 EBアシスト Cl_2 エッチングにおけるエッチング時間とエッチング深さの関係

調べた。塩素のフラックスは 7×10^{16} 分子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)とし、基板温度を70°C一定にして、電子ビームのフラックスを 4×10^{13} から 4×10^{14} 電子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)の範囲で変化し下地のGaAsのエッチング深さを調べた。これは酸化膜が数原子層という非常に薄い膜のため直接酸化膜のエッチングだけを観察することができず、下地のGaAs層のエッチング結果から逆に酸化膜がエッチングされる条件を調べる目的で行った実験である。

図5に電子ビームフラックスをパラメータとして、エッチング時間とエッチング深さの関係を示す。ある時間遅れの後エッチングが進行していることが分かる。この遅れ時間はGaAs表面に形成した酸化膜を除去するのに要した時間と考えられる。電子ビームフラックスの量が大いほど遅れ時間が短くなることも分かる。この結果から電子ビームのドーズに対してエッチング深さをプロットしたのが図6である。この実験では、所定のドーズになったところで電子ビームの照射を停止し、塩素ガス

図6 エッチングが始まる EB ドーズ

のみ照射を続け、塩素ガスの照射時間が20分のエッチングを行った。この図からドーズがおよそ $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ をしきい値として、酸化膜の下 GaAs のエッチングが進行していることが分かる。このような急峻なしきい値特性は、通常のリソグラフィでよく知られたものであり、微細加工をする上で不可欠な性質である。

ここで電子線照射による損傷に関して考察してみる。損傷の程度を見積もるため、EB アシスト Cl_2 エッチングした領域としていない領域とで PL 強度を比較した¹⁸⁾。照射ドーズは約 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 、エッチング深さは約 400 nm であった。試料は GaAs 基板で、測定は室温、大気中で行った。その結果両者の PL スペクトルはほぼ同じであり、イオン照射でみられるような顕著な劣化^{6,7)}はなかった。このことから電子ビームを用いた加工は、低損傷加工方法として有望である事が分かった。しかし、電子線の照射損傷に関してはさらに詳細な検討が必要と考える。

4.3 GaAs 酸化膜の除去と再成長

これまで述べたようにパターン形成の終わった GaAs 表面にはまだ酸化膜が残っている。この酸化膜を真空中で除去できれば、必要に応じて更に再成長することができ構造形成の自由度が広がる。そこで、As 圧下での熱処理を試みた。

表面に酸化膜が残っている試料を MBE 室に搬送し、As のビームフラックスが $2 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ の条件で試料を加熱しながら酸化膜除去の様子を RHEED で観察した。600°C 以下では、アモルファス層の存在を示すハローパターンが観察された。600°C を越えるあたりからストリークパターンが見えてきた。GaAs を空気中で 250°C で加熱して形成した酸化膜は真空中で 582°C に加熱することで除去されることや、オゾンを用いて形成した酸化膜は 638°C で除去される¹⁹⁾ことから考えて、本実験で形成されている酸化膜は熱酸化膜に近い性質を持っているものと考えられる。

図7 再成長した試料の表面写真とその層構造

酸化膜除去の後、AlGaAs の再成長を行った。まず (001) GaAs 基板に、およそ $1 \mu\text{m}$ の GaAs 層を成長し、前述の EB アシスト Cl_2 エッチングの工程により $35 \times 600 \mu\text{m}^2$ の矩形のパターンを形成した。エッチング深さは 60 nm とした。酸化膜除去後、 $0.5 \mu\text{m}$ 厚さの $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 層と $0.1 \mu\text{m}$ 厚さの GaAs 層を連続的に成長した。成長層の表面写真と断面の模式図を図 7 に示す。成長層の表面は良好なモフォロジイが得られていることが分かる。

以上のように、ポジ型プロセスでパターン形成から、再成長まで行えることを示した。

4.4 微細パターン形成

量子細線等の加工を考えた場合、任意のパターンを形成すること、及びそのパターンを微細化することが重要な課題となる。そこで、パターンジェネレータを用いたパターン形成の例を図 8 に示す。(a)(b)はライン & スペースパターンの例であり、それぞれ $[110][110]$ 方向に平行に形成している。(a)を拡大したのが図 9 である。エッチングされているライン幅が 200 nm、ラインピッチは $1.4 \mu\text{m}$ 、エッチング深さが 200 nm である。ほぼビーム径並の加工ができていることが分かる。エッチング側面は垂直でなく、少し蒲鉾型に近い形状となっている。これは酸化膜パターニング後 GaAs のエッチングは塩素ガスエッチングで行っているため、その影響で側面が少しだれてきているものと考えられる。

(c)は円柱状のパターンを残すエッチングを行っている。(d)は文字パターンの例として“OTL”のパターンを形成した例である。描画に要する時間は、(a)のライン & スペースで 5.5 分、(d)の文字パターンで 26 秒であった。平均のドーズは、 $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ であった。

EB アシスト Cl_2 エッチングでのパターンの微細化は、GaAs 酸化膜に形成するパターンの大きさでほぼ決まる。塩素ガス雰囲気中で電子ビームを照射したとき酸化膜の脱離は 1 次電子ビームの照射で生じる。1 次電子ビーム以外に、2 次電子の影響もあると考えられる。より微細なパターンを形成するには、上記のような酸化膜の

図8 微細パターンの形成例

脱離機構について知見を深めるとともに、1次電子ビームのスポットサイズを小さくすることも必要である。

5. ネガ型 *in situ* EB リソグラフィ

前節で述べた光酸化膜は電子ビームが照射されたところが除去されるポジ型のレジストである。目的とする素子構造によっては逆に電子ビームの照射されたところが残るネガ型のリソグラフィも必要となる。電子ビーム照射で酸化膜形成が促進されることが報告されている²⁰⁾。そこでこのEB照射酸化膜を *in situ* EB リソグラフィのネガ型レジストとして利用することを検討した。

5.1 パターン形成

図1及び図2を用いてネガ型プロセスの工程を説明する。

- ① GaAs 基板上に $0.2\mu\text{m}$ の GaAs バッファ層、 $0.1\mu\text{m}$ の AlGaAs マーカ層、 $1\mu\text{m}$ の GaAs 層を MBE 成長し、清浄表面を形成する。ここでのマーカ層は SEM 観察のために挿入している。
- ② 続いてエッチング室に試料を搬送し、酸素ガス雰囲気

中で EB 照射を行い酸化膜レジストを形成する。EB のエネルギーは 10 keV 、試料温度は室温とした。酸素フラックスは 2×10^{17} 分子 / ($\text{cm}^2 \text{ s}$) 一定とし、この条件で EB のドーズを 2×10^{16} から $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ まで照射時間を変えて変化させ、酸化膜形成条件を調べた。

- ③ その後酸素ガスを排気後、塩素ガスを導入し、 $5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ 、基板温度 150°C 、2 時間のエッチングを行った。

図10(a)に形成したパターンの SEM 写真を示す。 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ の EB ドーズで $4 \times 60 \mu\text{m}^2$ の領域を [110] 方向に平行にラスタースキャンした。マスクのある表面は平坦で、ガスエッチングに侵されていないことが分かる。図10(b)は断面 SEM 写真である。エッチング深さは $1\mu\text{m}$ 、順メサ形状をしていることが分かる。又表面側の GaAs 層は $1\mu\text{m}$ 、即ちマーカ層の上の成長層が全て残っていることから EB 照射酸化膜は 150°C 程度の塩素ガスエッチングにも十分な耐性があることが分かった。

5.2 オージェ分析

このマスク効果が本当に酸化膜によるものであるかど

図9 ライン&スペースのエッチングパターン

うかを確認する目的で表面のオージェ分析を行った。図11にMBE成長後の表面と、EB照射酸化後の表面のオージェスペクトルを示す。測定は、PHIの15-255GのCMAを用い、加速電圧3kV、試料電流19μA、2Vの変調をかけて行った。試料は320×280μm²の領域を4×10¹⁶cm⁻²のドーズでEB照射酸化膜を形成したものをを用いた。EB照射酸化膜は清浄GaAs表面と比較して、O、Clの信号しか検出されていない。Clはエッチング室に残留する塩素からきている。この結果からC等の汚染はみられず、図10で得られたマスク効果は酸化膜自身によるものと考えられる。EB照射酸化膜は主にGa₂O₃が形成されていると言われており¹⁹⁾、このGa₂O₃が塩素ガスに対する耐性の原因であると考えられる。

5.3 ドーズ依存性

EBドーズに対して塩素耐性を調べたのが図12である。EB照射領域の段差(H)の照射領域外のエッチング深さ(R)に対する比(H/R)は10¹⁸cm⁻²近傍でしきい値を持っていることが分かる。4×10¹⁸cm⁻²以上のドーズ量では完全にマスクとしての機能を果たしていることが分かる。前節で述べたポジ型と比較してしきい値ドーズが約1桁大きくなっているが、これは基板温度、ガス導入量等を最適化することで低減できるものと考えられる。

図13にライン&スペースの微細加工の例を示す。これは[110]方向に平行に形成している。幅100nmのライ

図10 EB照射酸化膜を用いて形成したパターンのSEM像とその断面SEM像

図11 MBE成長直後のGaAs表面とEB照射酸化膜表面のオージェスペクトル

ンが1.4μmのピッチで並んでいる。エッチング深さは100nmである。ポジ型と同様、ほぼビーム径並のパターンが形成されていることが分かる。ここに現れているラインの揺らぎは、機械的振動或いは、磁場ノイズの影響等によるものと考えられる。従って、ナノメートルオーダーの微細加工を実現するには振動対策、磁場ノイズ対策

図12 規格化したエッチング段差とEB ドーズとの関係

図13 EB 照射酸化膜をマスクに用いた場合のライン&スペースパターン

(a)

(b)

SEM
×35,000

(c)

CL
 $\lambda = 799.6 \text{ nm}$
 $T = 143\text{K}$

図14 (a)単一量子井戸埋め込み構造の断面模式図
(b)埋め込み構造のSEM 写真
(c)埋め込み構造のCL イメージ像

を十分行う必要がある。

5.4 埋め込み構造の形成

量子細線構造を想定して、単一量子井戸 (SQW) 構造を AlGaAs 層で埋め込むことを検討した²¹⁾。

図14(a)は作成した埋め込み構造の模式断面図である。7 nm の GaAs 井戸層を20 nm の Al_{0.3}Ga_{0.7}As 層ではさんだ SQW 構造からなり、その上に酸化膜形成用の GaAs 層を5 nm 成長した。ネガ型プロセスを用いて SQW 層を突き抜けて GaAs バッファ層に届くまでエッチングして $3 \times 60 \mu\text{m}^2$ の矩形パターンを形成した。その後で MBE 室に搬送し、 $0.4 \mu\text{m}$ の Al_{0.3}Ga_{0.7}As バリア層と5

nm の GaAs キャップ層を成長して埋め込み構造を形成した。

図14(b), (c)に SEM 写真とカソードルミネッセンス (CL) イメージ像を示す。CL 測定は10 kV の EB を用い、143 K で行った。イメージ像は、SQW の発光波長である799.6 nm に分光器を固定して測定した。図より SEM 像と、CL イメージ像とは良く対応していることが分かる。これから埋め込まれた SQW 構造は EB 照射直下にあるにも関わらず高い品質を持っていることが分かる。このことから 10^{18} cm^{-2} 以上のドーズでも CL 測

定に十分耐えられる品質の結晶が保持されている事から量子細線形成等に有望であると考えられる。

6. ま と め

以上述べた様に, *in situ* EB リソグラフィを用いることで試料を大気中に出さずに結晶成長→パターン形成→再成長, というプロセスを繰り返すことができることを示した。光酸化膜をレジストマスクとして用いるポジ型リソグラフィ, EB 照射酸化膜を利用したネガ型リソグラフィの両方に関して, ビーム径並の加工, 加工後の良好な再成長が行えることが分かった。

今後更に微細化を進めるとともに, 真空一貫プロセスの有効性を見きわめ, 埋め込み構造の品質向上をはかることで量子細線構造を実現していきたいと考えている。

謝 辞

日頃からご指導戴いている片山良史プロセス研究部長, 並びに林厳雄研究所長に感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) For example, H. Sakaki, Jpn. J. Appl. Phys. **19**, (1980) L735.
- 2) Y. Ochiai, K. Gamo and S. Namba, J. Vac. Sci. Technol. **B1**, (1983) 1047.
- 3) R. L. Kubena, R. J. Joyce, J. W. Ward, H. L. Garvin, F. P. Stratton and R. G. Brault, Appl. Phys. Lett. **50**, (1987) 1589.
- 4) N. Takado, K. Asakawa, T. Yuasa, S. Sugata, E. Miyauchi, H. Hashimoto and M. Ishii, Appl. Phys. Lett. **50**, (1987) 1891.
- 5) H. Temkin, L. R. Harriott, R. A. Hamm, J. Weiner and M. B. Panish, Appl. Phys. Lett. **54**, (1989) 1436.
- 6) M. Taneya, Y. Sugimoto and K. Akita, J. Appl. Phys. **66**, (1989) 1375.
- 7) Y. Sugimoto, M. Taneya, H. Hidaka and K. Akita, J. Appl. Phys. **68**, (1990) 2392.
- 8) T. Kosugi, R. Mimura, R. Aihara, K. Gamo and S. Namba, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, (1990) 2295.
- 9) M. Komuro and H. Hiroshima, J. Vac. Sci. Technol. **B9** (1991).
- 10) Y. Sugimoto, M. Taneya, and K. Akita, J. Vac. Sci. Technol. **B9** (1991) 2703.
- 11) M. Taneya, Y. Sugimoto, H. Hidaka and K. Akita, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, (1989) L515.
- 12) M. Taneya, Y. Sugimoto, H. Hidaka and K. Akita, J. Appl. Phys. **67**, (1990) 4297.
- 13) Y. Sugimoto, K. Akita, M. Taneya and H. Hidaka, Appl. Phys. Lett. **57**, (1990) 1012.
- 14) M. Taneya, Y. Sugimoto, H. Hidaka and K. Akita, J. Appl. Phys. **68**, (1990) 3630.
- 15) Y. Sugimoto, M. Taneya, K. Akita and H. Kawanishi, J. Appl. Phys. **69**, (1991) 2725.
- 16) Y. Sugimoto, M. Taneya, K. Akita and H. kawanishi, Microelectron. Eng. **13**, (1991) 403.
- 17) Y. Sugimoto, K. Akita, M. Taneya, H. Kawanishi, R. Aihara and T. Watahiki, Rev. Sci. Instrum. **62**, (1991) 1828.
- 18) K. Akita, Y. Sugimoto, M. Taneya, H. Hiratani, Y. Ohki, H. Kawanishi and Y. Katayama, Proc. SPIE **1392**, (1990) 576.
- 19) A. J. Spring Thorpe, S. J. Ingray, B. Emmerstorfer and P. Mandeville, Appl. Phys. Lett. **50**, (1987) 77.
- 20) W. Ranke and K. Jacobi, Surf. Sci. **47**, (1975) 525.
- 21) H. Kawanishi, Y. Sugimoto and T. Ishikawa, Appl. Phys. Lett. **60**, (1992) 365.