レーザー解説

光化学反応の半導体プロセスへの応用

有門経敏*・関根 誠*・岡野晴雄*・堀池靖浩*

(1984年7月6日 受理)

Application of photo Chemical Reaction to Semi-Conductor Process

Tsunetoshi ARIKADO*, Makoto SEKINE*, Haruo OKANO and Yasuhiro HORIIKE*

(Received July 6, 1984)

1. はじめに

最近のめざましいLSIの発展は、多くの先端技術によって成し上げられた。なかでも反応性イオンエッチング (RIE) や、プラズマ気相成長法 (PCVD) などプラズマプロセスが果たした役割は顕著である。しかしながら、プラズマ中に含まれるイオンや電子等荷電粒子は、素子に対して重大な放射損傷を与える。たとえばRIEの場合、イオン衝撃が原因となって生じる単結晶Siの結晶格子の破壊や¹⁾、ゲート酸化膜の絶縁破壊²⁾ など非常に重大な問題がある。そこで最近、プラズマに代って光エネルギーを使用するプロセスが注目を集めるようになった。

本報告は、最近なされた光エネルギーの半導体プロセスへの応用例についてまとめ、その将来動向について述べる。

2. エッチング技術への応用

光励起エッチングは、光エネルギーによって反応性ガスを分解し、生じたラジカルと被エッチング物との反応によって進む過程である。

光エネルギーのエッチングへの応用は、Steinfeldら³⁾ によってはじめてなされた。彼らは、TEA CO₂ レーザーを5.5 Torrに保ったCF₃Br ガスに照射し、SiO₂のエッチングを行った。CF₃Brは、多光子過程によりCF₃とBrとに分解するが、どちらがSiO₂に対して作用したのか明らかではない。SF₆ガスを多光子吸収により分解し、生じたF*ラジカルでSiやSiO₂をエッチングした報告例もある⁴⁾。可視光や紫外光を用いた例としては、Arイオンレーザーの2倍波によりCH₃FやCH₃Brガスを分解し、GaAsやInPをエッチングした例⁵⁾ およびArイオンレーザーを用いてCl₂ガスを解離し、単結晶Siをエッチングした例⁶⁾ などが報告されている。ここでは、我々の最近の研究結果をもとにして、エッチング反応を考察する。

2.1 実験方法^{7,8)}

Fig.1は、エッチング装置の概略図である。エッチング室はステンレス製円筒で、試料台、石英窓およびガス導入管を備える。排気系は、油回転ポンプとクライオポンプから成る。

* 東芝総合研究所研究第2部 (〒210 川崎市幸区小向東芝町1番地)

* Toshiba R & D Center, VLSI Research Center (1 Komukai Toshiba Saiwaiku Kawasaki 210)

Fig.1 Etching apparatus.

試料は、リン (P) やボロン (B) をイオン注入して導電型と抵抗を変化させた単結晶および多結晶 Si である。エッチングガスは、 Cl_2 を用いた。

光源として Hg-Xe ランプまたはエキシマレーザーを用いた。Hg-Xe ランプを用いる場合は、レンズで集光した。エキシマレーザーは、XeCl (308nm) を使い、パルス巾、繰り返し速度はそれぞれ 10 nsec および 80 pps とした。石英窓直後で測定した平均出力は、約 $3\text{W}/\text{cm}^2$ であった。

2.2 エッチング結果と考察^{7,8)}

Fig. 2 は、Hg-Xe ランプ光を P 添加多結晶 Si に平行に照射してエッチングした時の断面形状を示す SEM 写真である。Hg-Xe ランプの発する光のうち 300~400 nm の光は Cl_2 ガスに吸収され、 Cl^* ラジカルを生じる⁷⁾。P 添加多結晶 Si は、この Cl^* ラジカルと自然に反応するため、エッチング形状は Fig. 2 のごとく等方的となる。Fig. 3 は、無添加多結晶 Si のエッチング形状を示す SEM 写真である。エッチングマスクは光を通さない Al 膜で、(a) では光を垂直に、(b) では 30° 傾斜して導入した。この図から明らかなごとく、無添加多結晶 Si は Cl^* ラジカルと自然に反応せず、光照射された面のみエッチングされる。

Fig. 4 は、Hg-Xe ランプと Ar^+ イオンレーザーを併用して行なった無添加多結晶 Si のエッチング特性をまとめたものである。まず (i) の

Fig.2 Etching profile of P-doped poly-silicon.

Fig.3 Etching profile of undoped poly-silicon.

ごとく紫外光を多結晶 Si 面に垂直に照射すると 3 時間で約 $7000\text{\AA}$ エッチングされるが、(ii) のごとく平行に照射すると全くエッチングされない。また (iii) のごとく Ar^+ イオンレーザー光を直接表面に照射してもエッチングは起こらない。しかし、紫外光を多結晶 Si に平行に入射し、 Ar^+ イオンレーザーを表面に垂直に入射すると、(iv) のごとくわずかにエッチングが起

Etching Condition	Etched Depth/3hr
(i) Hg-Xe Lamp	7000Å
(ii)	No Etching
(iii) Ar ⁺ Ion Laser (2 W)	No Etching
(iv)	1000Å
(V) $T_s = 200^\circ\text{C}$	No Etching

Fig.4 Etching characteristics of undoped polysilicon.

Fig.5 Variation in etch rate as a function of sheet resistance.

こる。Ar⁺イオンレーザーをCA熱電対に照射すると約200℃の温度上昇を示す。そこで(V)のように、ヒータでウエハを200℃に加熱し、紫外光を多結晶Siに対して平行に照射してみたがエッチングは起こらなかった。この事実は、多結晶Si表面の光照射効果が熱効果でないことを示している。

次にエッチング速度の導電型と抵抗によるエッチング速度の変化を調べた。Fig.5は、多結晶Siにリンまたはボロンをイオン注入した後熱処理を行ないシート抵抗を変化させた試料のエッチング速度である。この実験では、紫外光を試料表面に照射した。リン添加試料すなわちn型の場合、シート抵抗の増大とともにエッチング速度は低下するが、ボロン添加試料すなわちP型の場合、逆の傾向を示す。このシート抵抗によるエッチング速度の傾向は、伝導帯における電子数の変化と同一の傾向であることから、伝導体中の電子濃度がエッチング速度を決定する重要な因子であると結論できる。

同様の傾向は、単結晶Siエッチングにおいても見られる。Fig.6は、Fig.5と同様の方法で抵抗を変えた(100)と(111)面のエッチング速度の変化を示す。この実験では、光源としてエキシマレーザーを使用した。図中横軸は、伝導帯中の電子が減少する方向で目盛っており、縦軸は、単位エネルギー照射時のエッチング深さを示す。多結晶Siと同様に伝導帯中の電子の減少に伴って、エッチング深さは減少する。また、一般に(100)>(111)となっている。

Fig.6 Variation in etched depth of single silicon as a function of sheet resistance.

最近XPS⁹⁾ やシンクロトロン放射¹⁰⁾ を用いたSi-F系での表面観察結果から、Si表層から少し内側にF化した中間層(SiF_x, x=1~3)が存在することが明らかにされ、またFはHよりも容易にSi格子内へ侵入できるという計算結果^{11,12)} も報告されている。これらの結果を踏まえ、Chuangらは、XeF₂による光励起エッチングにおいて、Si側から吸着F原子への電子移動が起こり、生じたF⁻イオンが表面に生じた電界によって中間層内に引き込まれ、生成物SiF₄を形成して気相中へ脱離してゆくと考えた^{13,14)}。

同様の考えに基づき以下のようにエッチング機構を考察した。まず、リン添加Siでは、伝導帯中に 10^{21}cm^{-3} 程度の電子が存在するため、充分なCl⁻が形成される。その結果、表面を光照射しなくてもエッチングが進行する。一方無添加またはボロン添加Siの場合伝導帯中に電子が乏しいため、表面を光照射し伝導帯中に電子を励起しないとエッチングが進まない。単結晶Siの場合(111)面は(100)面に比較して原子空隙が小さく¹⁴⁾ Cl⁻イオンが侵入しにくいいため、エッチング速度は(100)>(111)となると考えられる。

2.3 レジストレスエッチング

既に述べたごとく、無添加多結晶Siは紫外光が照射された領域のみがエッチングされる。したがってガラスマスクを通してパターン状の光を照射するならば、リソグラフィ工程を経るこ

となく直接パターンを形成することが可能である。

Fig.7は、レジストレスエッチング装置の概略図である。光源として、XeClエキシマレーザーを用いた。マスクは、石英基板上にAlでパターンを形成したもので、無添加多結晶Si表面から約100 μm の位置に配置した。照射されたレーザー光のうちマスクを透過した光は、マスクと試料間でCl₂を分解してCl^{*}ラジカルとし、さらに多結晶Siに吸収されて電子-ホール対を生成する。Cl^{*}ラジカルとレーザー光によって

Fig.7 Schematic illustration of resistless etching.

Fig.8 Pattern etched by resistless etching method.

励起された多結晶Siだけがエッチング反応を行ない、レジストレスエッチングが達成される。

Fig.8は、このようにして形成されたエッチングパターンの写真(a)と一部を拡大したSEM写真である。本方法は、レジストを使用しないため、従来のリソグラフィ工程を経る方法に比較して工程数が大巾に短縮される。現在は、プロキシミティコンタクト方式を用いているが、屈折光学系などと組合せることによりさらに微細なパターンを精度良く加工することが可能になるとと思われる。

3. リソグラフィ技術への応用

エキシマレーザーのリソグラフィへの応用は、河村ら¹⁶⁾によって最初になされた。彼らは、ベンゾインで増感したPMMAをKrFレーザーで露光を行ない、パルスエネルギーが大きいほどPMMAの現像深さが深くなる現象を見出した。その後Jainら^{17,18)}によって種々のレジストの露光が試みられている。

著者らもエキシマレーザーを利用して種々のレジストの露光実験を試みた。Table 1に露光したレジストと現像条件をまとめた。露光実験は、カスパー社製コンタクトアライナーを使用した。またレーザー出力窓直後に各種フィルターを装着し、パルス当りのエネルギー値を変えた。

Fig.9と10は、ポジ型レジストOFPR-800およびPMMAの感度曲線である。OFPR-800の残膜率は、パルスエネルギーに依存せず照射した全エネルギーのみに依存する。すなわち相反則が成立している。感度は、超高圧水銀灯を使

Fig.9 Sensitivity curve of OFPR-800.

Fig.10 Sensitivity curve of PMMA.

Table 1 Experimental condition.

レジスト	露光波長 (nm)	現像液	現像時間 (秒)
OFPR-800	308 (XeCl)	コリン	90
OMR-83	308 (XeCl)	キシレン	60
PMMA	222 (KrCl)	MIBK	300
PMIPK	222 (KrCl)	MIBK(66%)+ エチルベンゼン(20%) +キシレン(14%)	60

用した場合に比較して低いが、これはOFPR 800の308nm付近における吸収係数が小さいことに起因する。ポジ型レジストのジアジド感光基は350~450nm付近の光をよく吸収するため、XeCl光よりもむしろXeF光の方が適しているかも知れない。ネガ型レジストであるOMR83およびDeep UVレジストとしてよく知られて

いるPMIPKの場合もOFPR800と同様で、相反則が成立する。

PMMAの場合、Fig. 10に示すごとく相反則が成立せず、パルスエネルギーが大である程レジストの感度が高くなる。相反則不成立の理由は明らかではないが、感度曲線の温度依存性を測定したところ、温度に対して非常に大きな依存性を示したことから、加熱効果のためではないかと推論される。

光露光における解像力は、露光波長/開口数(NA)で決定される。開口数の拡大による解像力向上には限度があることから、短波長化が有力と考えられている。コンタクト方式ながらF₂レーザーを用いて0.25 μ mのパターン形成が報告されて以来¹⁹⁾、限界がささやかれつつあった光露光技術が改めて見直されている。また強烈なエキシマレーザー光を照射してレジスト分子の結合を切断し、揮発させて現象まで一気にこなってしまう方法(Ablation)も注目に値する方法であり^{20,21)}、今後の発展が期待される。

4. 表面清浄化技術への応用

LSIにおいては、ごく微量の不純物が素子の歩留りや特性に悪影響を与えるため表面清浄化技術は重要である。

最近超高真空中でSi表面にレーザー光を照射して、表面の“Native Oxide”を除去し、清浄なSi表面を出す試みがなされている。たとえば、Zehnerらは²²⁾、 2×10^{-10} Torrの超高真空中で“Native Oxide”に覆われたSi表面に1パルス当り2 J/cm²のエネルギーを有するルビーレーザーを照射し表面をオージェ電子分光法で評価したところ、15パルスで“Native Oxide”が除去されSiの清浄表面が得られることを報告している。Cowanら²³⁾やBermudez²⁴⁾も同様のことを報告している。その他ステンレスティール表面にNd-YAGレーザーを照射し、表面酸化膜を除去する例も報告されている²⁵⁾。

このような超高真空中での大出力レーザー光照射は、蒸発により表面の酸化膜を除去する方法である。単に表面処理で終わるならば問題は

ないが、LSIのごとく素子を形成する場合には問題が生じることがある。たとえば、レーザー光の熱でSi表面が溶融し、結晶化する際に酸素が溶解し欠陥の原因になること²⁶⁾およびそれが電気的特性を損うこと²⁷⁾が報告されている。

ドライ表面清浄化技術は非常に魅力的な技術であるが、それを実現するためには、物理的手法のみならず化学的手法を積極的に利用する必要があると考えられる。

5. 酸化技術への応用

ゲート酸化膜は益々薄くなり、プロセスは低温化が要求される。したがって低温で完全な薄い酸化膜が形成が重要になる。酸化膜厚と時間との関係は、初期過程では一次則となり、膜厚が厚くなると二次則となる。一次則の領域では、酸化剤の拡散よりも表面での反応が律速過程であり、また二次則の領域では、酸化剤の拡散が律速過程となっている。したがって薄い酸化膜形成においては、表面反応が重要となって来る。

Siの酸化中にUVレーザー光を照射すると酸化速度が60%向上したと報告された。これは、UVレーザー光によりSiが励起され電子-正孔対を生じ、電子が酸素に付着して負イオンを生成し、これがSi中の正孔と引き合ってO⁻イオンがSi中に入り酸化が促進すると考えられた²⁸⁾。Siの両側に多孔質のPt電極をつけ電圧を印加しながら酸化した結果、Si基板が+側になった時の酸化速度が速くなることが見いだされた²⁹⁾。これは、上記推論を裏付ける結果である。また通常の熱酸化では酸化速度は(111)>(100)であるが、UV光照射による酸化速度の増加率は(100)>(111)であることも報告されている³⁰⁾。酸化機構解明の点からも興味深い。

6. ドーピング技術への応用

レーザー光は、不純物のドーピングにも応用できる。今後LSIのパターン寸法の微細化に伴い拡散層深さも浅くなる。光エネルギーを利用するドーピング方法は、浅い接合形成の有力な手段となる可能性がある。

IBBS らは³¹⁾ Fig. 11に示すような装置内に三エチルホウ素ガスを導入し、ArFエキシマレ

Fig. 11 Schematic illustration of laser doping apparatus.

Fig. 12 In-depth profile of dopant concentration and resistance.

ーザー光を照射した。表面から順次エッチングして広がり抵抗を測定してドーパントの深さ方向の分布を求めたものがFig. 11である。ArF光は、三エチルホウ素を分解すると同時にSi表層を熔融させる。ホウ素は熔融したSi層内を急速に拡散するためFig. 12のごとく急峻な不純物プロファイルが実現される。その他にBCl₃を用いたBのドーピング³²⁾、InPへCdやZnの添加によるオーム性接触の作製³³⁾、多結晶Al中へのZnの拡散³⁴⁾などが報告されている。

7. 薄膜形成技術への応用

光エネルギーを利用した薄膜形成研究例は非常に多く、金属、絶縁物および半導体薄膜など種々の薄膜が堆積されている。堆積方法は、ガスを熱分解する方法と光分解する方法とに大別される。前者の例としては、CO₂レーザー光で加熱されたSiO₂上へSiH₄を通し多結晶Siを堆積した例³⁵⁾やAr⁺イオンレーザーによる非晶質Siの堆積などがある³⁶⁾。またCO₂レーザーでSiH₄を振動励起する方法も試みられている³⁷⁾。すなわちSiH₄は、P(20)線をよく吸収し分解される。しかしこの方法は主として気相反応であり、生成物は粒状となる。他にTEA-CO₂レーザーを用いたガス分解例があるが^{36, 39)}、やはり気相反応であり生成物は微粒子である。

ガスを光分解する方法としては、Hgなど増感剤を用いる方法と直接光分解する方法とがある。

前者は、系内に含有されたHgを紫外光によって励起し、励起状態のHgとガス分子との衝突を介するエネルギー移動によりガス分子を解離する方法である。この方法でSiH₄、SiH₄/N₂O、SiH₄/NH₃などのガスを分解して非晶質Si⁴⁰⁾、SiO₂^{41, 42, 43)}、SiN⁴⁴⁾などが堆積されている。凹凸を有する基板上に堆積した場合、段差被覆形状は良好であるが、膜中に水素の混入がある。

紫外光を用いた直接光分解による堆積は多数報告されており、以下主なものを紹介する。

Al(CH₃)₃やCd(CH₃)₂などのアルキル金属は200nm付近に吸収ピークがあり、260nm以下ならば吸収がある。そこでAr⁺イオンレーザー

の第2高調波(257nm)やArFエキシマレーザを照射して、AlやCdを堆積できる⁴⁵⁾。後者のパルスに対し前者はCWであり、集束したビームを走査しパターン状に堆積する方法も示されている。このような技術は、ゲート膜付きのトランジスタのゲート膜上にCdを直接堆積して相互コンダクタンスを変えたり⁴⁶⁾、金属マスクの補修などに応用された⁴⁷⁾。

これらの研究過程で以下の興味ある結果が得られた。有機金属化合物ガスを一度チャンバーに導入した後排気すると、吸着単分子層が形成される。この吸着層に集束したレーザー光を照射し分解する。次に再びガスを導入し、絞らないでフラッドにレーザーを照射すると、最初に集束ビームで走査した部分にだけ選択的に堆積する。これは光分解が界面で行われ、最初の過程で核生成が起ったためである⁴⁸⁾。

エキシマレーザーを用いた絶縁膜堆積では、ArFレーザーを使用したSiO₂⁴⁹⁾やZnO⁵⁰⁾の堆積がある。これは、N₂Oを光解離し生じたO(¹D)でSiH₄やAl(CH₃)₃を酸化するものである。段差上での堆積形状は良好である。

光エネルギー特にレーザーを利用した薄膜堆積技術は、低温での堆積を可能にするばかりでなく、集束レーザー光を走査するなどの方法で直接パターン状に薄膜を堆積しうる。しかしながら従来の報告は、主として堆積にとどまっております。生成した膜の物性およびメカニズムの研究例は少ない。

8. 光励起プロセスのVLSIへの展開と問題点

前章に述べた種々の応用例をつなぎ合わせるとFig. 12に示すようにほとんど全ての製造工程を光プロセスで行ないうる。現在は、その実現へ向けて一歩ふみ出したばかりといえる。解決すべき問題点としては、

- (i) 洗浄——アルカリ元素、有機、無機物の除去、Siの無欠陥エッチング等
- (ii) 酸化——低温化、無欠陥化等
- (iii) エッチング——高反応性、SiO₂、Alの

エッチング等

(iv) 堆積——表面反応へもってゆくこと

(v) ドーピング——浅い拡散等

これらの開発には異産業間の協力が必要であるが、本技術開発の暁には、VLSI製造に大きなインパクトを与えるであろう。

参 考 文 献

- 1) N. Yabumoto, M. Oshima, O. Michigami and S. Yoshii: Jpn. J. Appl. Phys. **20** (1981) 803.
- 2) Y. Yoshida and T. Watanabe: Proc. 5th Dry Process Symposium (1983) 4.
- 3) J. I. Steinfeld, T. G. Anderson, C. Reiser, D. R. Denison, L. D. Hartsough and J. R. Hollahan: J. Electrochem. Soc. **127** (1980) 514.
- 4) T. J. Chuang: J. Chem. Phys. **72** (1980) 6303.
- 5) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr. and T. F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 698.
- 6) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr. and T. F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 1018.
- 7) M. Sekine, H. Okano and Y. Horiike: Proc. of 5th Dry Process Symposium (1983) 97.
- 8) T. Arikado, M. Sekine, H. Okano and Y. Horiike: Proc. of MRS. **195** (1983) 403.
- 9) T. J. Chuang: J. Appl. Phys. **51** (1980) 2614.
- 10) F. R. McFeely: to be published.
- 11) M. Seel and P. S. Bagus: Phys. Rev. **B23** (1981) 5464.
- 12) P. S. Bagus, B. Lui, A. D. Mclean and M. Yoshimine: Computational Method in Chemistry (Plenum, New York) (1980) 203.
- 13) H. F. Winters, J. W. Coburn and T. J. Chuany: J. Vac. Sci. Technol. **B1** (1983) 469.
- 14) T. J. Chuany: Proc. of MRS (1983).
- 15) T. Kurl and Y. Tamaki: Proc. of 3th Dry Process Symposium **II-7** (1981) 83.
- 16) Y. Kawamura, K. Toyoda and S. Namba: Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 402.
- 17) K. Jain, C. G. Willson, S. Pice, L. Pederson and B. J. Lin: Proc. Int. Conf. Microcircuit Engineering, Grenoble, France (1982) 69.
- 18) K. Jain, C. G. Willson and B. J. Lin: IBM J. Res. Develop. **26** (1982) 151.
- 19) H. G. Craighead, J. C. White, R. E. Howard, L. D. Jackel, R. E. Behringer, J. E. Sweeney and R. W. Epworth: J. Vac. Sci. Technol. **B1** (1983) 1186.
- 20) J. E. Andrew, P. E. Dyer, D. Forster and P. H. Key: Appl. Phys. Lett. **43** (1983) 717.
- 21) S. Srinivasan and V. Mayne-Banton: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 576.
- 22) D. M. Zehner, C. W. White and G. W. Qunby: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 56.

- 23) P. L. Cowan and J. A. Golovchenko: J. Vac. Sci. Technol. **17** (1980) 1197.
- 24) V. M. Bermudez: J. Vac. Sci. Technol. **20** (1982) 51.
- 25) L. Papagno and R. Scarmozzino: Thin Solid Filt. (1981) 221.
- 26) A. Garulli, M. Servidori and I. Vecchi: J. Phys. D: Appl. Phys. **13** (1980) L199.
- 27) K. Hoh, H. Koyama, K. Uda and Y. Miura: Jpn. J. Appl. Phys. **19** (1980) L375.
- 28) S. A. Schafer and S. A. Lyon: J. Vac. Sci. Technol. **19** (1981) 494.
- 29) P. J. Jorgensen: J. Chem. Phys. **37** (1962) 874.
- 30) E. M. Young and S. Ghandhi: Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 63.
- 31) K. G. Ibbs and M. L. Lloyd: Opt. and Laser Technology, (1983) 35.
- 32) T. F. Deutch, J. C. C. Fan, G. W. Turner, R. L. Chapman, D. J. Ehrlich and R. M. Osgood, Jr.: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 144.
- 33) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr. and T. F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 916.
- 34) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr. and T. F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 399.
- 35) C. P. Christensen and K. M. Lakin: Appl. Phys. Lett. **32** (1978) 254.
- 36) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood and T. F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. **39** (1981) 957.
- 37) M. Hanabusa and A. Namiki: Appl. Phys. Lett. **35** (1979) 626.
- 38) C. W. Draper: Metallurgical Transactions A **11A** (1980) 349.
- 39) C. W. Draper: J. Phys. Chem. **84** (1980) 2089.
- 40) 斎藤忠: 第30回応用物理学会連合講演会予稿集, (1983) 320.
- 41) H. Itoh, M. Hatanaka, H. Abe and H. Nakata: Proc. of 5th Dry Process Symposium, Tokyo (1983) 91.
- 42) J. Y. Chen, R. C. Henderson, J. T. Hall and E. W. Yee: Proc. IEDM 82 (1982) 233.
- 43) J. W. Peters: IEDM Digest (1981) p. 240.
- 44) K. Hamano, Y. Numasawa and K. Yamazaki: Proc. of 5th Dry Process Symposium, Tokyo (1983) 85.
- 45) T. H. Wood, J. C. White and B. A. Thacker: Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 408.
- 46) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood and T. F. Deutsch: J. Vac. Sci. Technol. **21** (1982) 23.
- 47) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr. D. J. Silversmith and T. F. Deutsch: IEEE Electron. Device Lett. **EDL-1** (1980).
- 48) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood and T. F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 946.
- 49) P. K. Boyer, G. A. Roche, W. H. Ritchie and G. J. Collins: Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 716.
- 50) R. Solanki and G. C. Collins: Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 662.