特 集

レ ー ザ ー C V D

青 柳 克 信*

(1988年 8 月 1 日 受理)

Laser CVD

Yoshinobu AOYAGI*

(Received August 1, 1988)

After development of an excimer laser, laser CVD is greatly progressed for several materials such as Si, III-V, II-VI compounds, diamond, and dielectric materials, especially on the point of application to high quality deposition at low temperature, patterned crystal growth, and development of new materials. However, the mechanism of laser CVD has not yet been clarified in many materials. In this paper laser epitaxy of GaAs is reviewed and the characteristics of the laser epitaxy and the growth mechanism are discussed.

Key Words: Laser CVD, Laser ALE, Laser MOVPE, Low temperature epitaxy.

1. はじめに

エキシマレーザーの開発以来, レーザーCVDの研究が半導体プロセスの低温化或は, 加工の微細化の要求とあいまって急速に活発になっている。

その研究は極めて広い範囲にわたっており, Si^{1~19)}, III-V^{20~51)}, II-VI族^{52~63)} 化合物半導体のエピタキシー, メタル^{64~71)}, ダイヤモンド^{72~76)}, 絶縁膜^{77~100)} の堆積等がある。

レーザーCVDについては今まで既に数多くの優れた解説^{101~111)} があるが, その特長について今一度整理してみると以下に要約されるで

あろう。

1.1 レーザーCVDの特長

第1番目はCVDの低温化である。高温での熱平衡結晶成長は, 理想的な化学量論的組成からのずれを必然的に伴っており, 高品質結晶を考える場合低温化が望ましい。レーザーCVDは波長を選択することにより低温で原料ガスのある特定の結合のみを励起, 切断でき低温での結晶成長が期待できる。一方低温では結晶表面での原子の泳動が十分できなくなり, 良い結晶が望めなくなる。しかし, レーザー照射下では表面での分子, 原子の泳動が誘起されると考え

* 理化学研究所レーザー科学研究グループ (〒351-01 埼玉県和光市広沢 2-1)

* The Institute of Physical and Chemical Research (Wako, Saitama, 351-01)

られており、この点からもレーザーによるCVDの低温高品質膜の製作が期待されている。また、結晶成長の低温化は、相互拡散の大きな材料間でのヘテロ接合、或は、拡散係数の大きな不純物を含む材料間の接合を研成する場合、必要不可欠である。レーザーCVDはこの要求に対しても解を与えてくれる。

第2番目は、マスクレスプロセスの可能性である。現在の半導体デバイスが何段階ものマスクプロセスを前提として出来上がっていることは周知の事実であるが、このマスクプロセスは、デバイス製作の工程を長くするばかりではなく、大気中に出すことによる表面層変質、或は、種々のマスクプロセスからくる材料汚染など、多くの問題点を抱えている。しかし、レーザーCVDは、ある特定の場所に特定組成の材料を、不純物を制御しながら大気中に取り出すことなく成長できる可能性があるため、将来、半導体プロセスの大きな技術的ブレークスルーになるポテンシャルを持っている。

第3番目は、新しい“人工的な材料”を作り出せる可能性である。現在のレーザーCVDにおいてもII—IV化合物の荷電子制御が可能になるのではという考えの下に実験を進めているグループがあり、これが実現できれば熱平衡の結晶成長では期待できない人工的材料と言える。また、レーザー単原子層制御結晶成長においても、原子層単位の制御が局所的に可能であることより、将来的には、短波長レーザーを使うことにより、種々の材料での量子細線、或は量子箱がリソグラフィー技術なしで作られる可能性を有している。また、現在のレーザーCVDは一波長励起が大部分であるが、多波長励起による完全外部制御による結晶成長も可能となる。即ち、ある特定波長の光に対して、ある特定材料の原料ガスのみが分解出来れば、その波長選択により、種々の組成の材料が出来る。また、これらは全て原子層単位で可能となり、スーパーコンピューターと組み合わせた新材料開発も夢ではない。

第4番目は、光表面反応機構の解明である。

表面は、気相、固相とは全く違った性質を持っており、表面相という一つの状態相と考えたほうが良い場合が多い。一番典型的な例は、固体表面での光触媒効果であり、気相では考えにくい反応が表面で起こる。しかし、表面での電子結合の制御は全くまだなされておらず、レーザーCVDが新しい表面を絶えず創製しながら進んでいることを考えると、表面制御には最適のターゲットと考えられる。

以上大きく4つに分けてレーザーCVDの特長を述べたが、次に光によってCVDに期待される個々の現象についても整理しておきたい。

- 通常光によって期待されるCVDでの現象は
- ① 気相並びに表面での材料分子の励起、分解、合成、
 - ② 表面での材料分子の吸着、脱離、移動の促進、
 - ③ 表面励起による光触媒効果の発現、
 - ④ 基板加熱効果、

が考えられる。①に関しては、既に多くの実験の積み重ねがある。②、③に関してはしばしば期待され、それらしい現象は多く見つかっているものの④との区別が難しく、明確な実験はそれほど多くないことを述べておきたい。しかし、②、③の実験的、理論的研究はこれからの大きな課題である。

以上レーザーCVDに関しその特長について述べた。

本解説ではGaAsのレーザーエピタキシーを中心に上記レーザーCVDの実験結果の具体的な例を述べたい。

2. レーザーCVDの実際

2.1 レーザーCVDの装置例

GaAsのレーザーCVDは、レーザーとしてArレーザー、エキシマレーザーをよく用いる。他に赤外光源としてのCO₂レーザー、或は選択励起を目的とした色素レーザーなどが考えられるがGaAsに対してはまだ用いられていない。ガスソースは3族に対してはトリメチルガリウム(TMG)、トリエチルガリウム(TEG)、トリメ

Fig.1 Absorption spectrum of AsH_3 .

Fig.2 Absorption spectrum of TMG.

チルアルミニウム (TMA) 等の有機金属ガスがまたは、5 族としてはアルシン (AsH_3) がよく用いられている。通常有機金属ガスや AsH_3 は Fig.1, 2⁴⁷⁾ に示すごとく気相中では紫外域にしか吸収を持たないため、その波長域に発振波を持つエキシマレーザーがよく用いられる。しかし、Arレーザーも熱源或は、表面反応の励起光源として、しばしば用いられる。エキシマレーザーとArレーザーを用いた場合CVDに対する特性比較を表面励起型レーザーCVDを例にとって整理してみると、以下の事が考えられる。エキシマレーザーはパルス動作しか実現できず、パルス幅も短いため照射基板での瞬間的溫度上昇はかなり大きい。しかし、これが表面反応にどう関与しているかは不明である。Arレーザーの場合はCW動作のため定期的に基板

の溫度が上昇する。また、分解反応はエキシマレーザーの場合、気相、表面の両方で反応が起こるため、堆積のメカニズムは複雑となる。Arレーザーの場合は表面反応しか期待できないが、その表面反応効率が小さいため、熱効果との区別がレーザーCVD機構を理解する上で重要である。いずれの場合もレーザー照射の効果は、分解反応ばかりでなく。吸着種の表面脱離速度、表面泳動にも影響を与えていることに注意する必要がある。また、これらは応用としてそれぞれ透影型パターン化結晶成長、直描型パターン化結晶成長が期待される。Fig.3にArレーザーを用いたALE(単原子層制御エピタキシー)の装置⁵⁰⁾ 並びに Fig.4 にはエキシマを使ったCVD炉の例⁴³⁾ を示す。アルゴンレーザー励起の場合有機金属ガスは気相で可視域に吸収を持たないため材料の気相分解は起こらず、照射窓は曇らない。しかし、エキシマ励起の場合、Fig.2からも明らかとおり気相での吸収があり、分解したGaが照射窓に付着する。Fig.4では、照射窓近傍は水素ガスを直接導入することにより気相中の分解生成物が窓につくのを防止している。

ガス供給及びレーザーの照射条件は、目的によって異なってくる。Table Iにエキシマレーザーを用いた場合のレーザーMOVPEの成長条件の例⁴¹⁾ をまた、ガスを交互供給して行なうレーザーALEの時系列パルス例³²⁾ をFig.5に示す。

Fig.3 Schematic diagram of the laser ALE system.

Fig.4 Schematic diagram of laser MOVPE system for excimer laser.

Table I. Typical growth condition for laser MOVPE of GaAs and AlGaAs.

	GaAs	AlGaAs
Substrate	GaAs : Cr (100) 2° off	
Growth temperature (°C)	550 ~ 750	570 ~ 800
Reactor pressure (Torr)	50 ~ 200	50
Flow rate (sccm)		
TMAI	—	0.02 ~ 0.14
TMGa	0.4 ~ 1.0	0.12 ~ 0.36
AsH ₃	2 ~ 200	100
Total H ₂	5000	5000
Excimer laser (ArF)		
Wavelength (nm)	193	
Energy (mJ/cm ² · pulse)	30	
Repetition rate (Hz)	50	
Average power (W/cm ²)	1.5

Fig.5 Typical time sequences of the source gas flow and the laser irradiation in laser ALE.

2.2 レーザーCVDによる結晶成長の低温化

レーザーCVDの特長の一つは成長の低温化であるがまずその例について述べる。Fig. 6は通常の光CVDの例であるが、減圧Hg-ジエチルテルライド (Et₂Te) 系MOVPEにおけるUV照射 (Hgランプ) 下でのHgTeの結晶成長速度を基板温度依存性を示す⁵⁴⁾。通常HgTe/CdTe ヘテロエピタキシーでは成長温度が400℃の場合、界面遷移幅は約0.1 μmとなるが、この値は超格子等の製作で要求される10 Å以下の値より大幅に大きい。界面での相互

Fig. 6 Growth rate versus substrate temperature of HgTe on {100} InSb substrates under Hg lamp irradiation.

Fig. 7 Enhancement of the growth rate (Δd) of GaAs under Ar laser irradiation. d_{nor} : growth rate without the laser irradiation. The dashed line shows a calculated enhancement factor ($\Delta d/d_{nor}$) under the assumption of the temperature increase of 670 °C under the laser irradiation.

拡散を減らすため、従来法で400 °C以下の低温成長を行なうと、Teのソースガスである Et_2Te の熱分解が不十分となり、安定なソースガスの供給ができない。しかし、Fig. 6から明かな通り、光照射下では200 °C~300 °Cの低温でも約1 μm ~2 $\mu\text{m}/\text{h}$ の成長速度を得ることが出来、HgTe/CdTeエテロエピタキシーにおいて低温化に伴う界面での相互拡散が大きく抑えられる事が分かってきた。また、Fig. 7にArレーザーを連続照射した場合のGaAsの成長速度の温度依存性を示す²⁴⁾。原料は AsH_3 -TMG系で100mbの減圧MOVPEで実験は行なわれた。レーザー照射により成長速度が低温では100倍も増倍され低温成長が可能であることを示している。これをレーザー照射の温度上昇によるものと考え、レーザー照射によって530 °Cの成長で670 °Cでも温度が上がってくるの必要があり入射レーザーパワーとスポットサイズから評価される温度上昇60 °Cとは大きくずれている。更に、温度上昇を考慮した場合の成長の温度変化は破線で示すごとく、実験結果を全く説明できない。また、Fig. 8は AsH_3 とTMG交互供給の条件の下でTMGにArレーザーを同期励起した場合の実験結果を

Fig. 8 Temperature dependence of the growth rate with and without the laser irradiation for TMG and TEG.

示す³³⁾。光を当てない時は温度の低下と共に成長速度は低下するか、Arレーザー光を当てると350℃近くの低温で成長速度は1サイクル当たり1原子層の成長条件でプラトーとなる。この値は、光を当てないとき予想される成長速度よりはるかに大きく更に、ある温度範囲で温度に依存しないことが特長である。以上述べた如くレーザー照射により低温でも十分実用的な成長速度が得られ、界面での相互拡散等が抑制されることが期待される。

2.3 レーザーCVDによるドーピング並びにパターン化結晶成長

レーザーCVDの第2番目の特長はパターン化結晶成長即ち、照射領域のみ組成、ドーピング量並びに成長速度、形状を制御出来ることである。

Fig.10 Position dependence of Al mole fraction for AlGaAs.

Fig.9 Carrier concentration of Si in GaAs as a function of $[TMSi]/[TMGa]$ with and without excimer laser irradiation (193 nm).

Fig. 9は光励起によりGaAsにSiドーピングを行った例を示す⁴⁴⁾。この場合減圧AsH₃-トリメチルガリウム (TMG) 系MOVPEで結晶成長を行っており、ドーピングガスとしてテトラメチルシラン (TMSi) を用いている。照射光はArFエキシマレーザー (193nm) であり、Hall効果の測定より光を照射すると一桁近くドーピング量が上がることが分かった。また、CdTeのドーピングの実験ではMBE結晶成長中にArレーザー (150mW/cm², 514~528nm) を照射すると基板温度230℃でInのドーピングが光の照射しない場合の値 2×10^{16} から 6×10^{17} まで30倍増速されることも報告されている⁵⁹⁾。また、Fig. 10はGa_{1-x}Al_xAsの組成比 x がArFエキシマレーザー (193nm) 光照射によって制御されている様子を示している⁴¹⁾。この場合光照射部 (左側) は、Alのモル比が約0.03上がっていることが分かる。変化の量はまだ十分には大きくないが、光照射により組成やドーピング量を外部より制御できる事が分かる。また、光エピタキシーではパターン化結晶成長が可能であるが、Fig. 11にレーザーALEを用いた場合のパターン化結晶成長模式図の例を示す。

通常のレーザーMOVPEによるパターン化は同左図に示す如く表面はレーザーの強度分布に対応した形状となる。しかし、レーザーALEの場合、同右図からも明かな通り成長表面は平坦となっており、平坦なヘテロ接合、或は、量子井戸などをパターン化しながら作ることが出来る。従って色々なデバイスから見たパター

Fig. 11 Schematic diagram of line epitaxy for Laser MOVPE and Laser ALE.

Fig. 12 Photograph of line epitaxy of GaAs by laser ALE.

ン化結晶成長はレーザーALEが適している。またFig. 12は、パターン化を試みた例を示す¹¹⁵⁾。パターンはいずれもまだ大きいが今後の発展が期待される。

2.4 レーザーCVDの機構

表面励起型レーザーCVDの機構を考える場合、その反応が熱反応によるものか、或は、表面反応によるものか興味深い。特にArレーザー励起の場合、有機金属ガスを気相中で直接分解する光エネルギーを持っていないため、エキシマレーザー励起の場合とは異なり、熱反応と考えられていた。しかし、最近の研究は光表面反応が重要な役割を果たしつつある事が分かってきている⁵⁰⁾。即ち、固体表面に吸着した有機金属の電子状態は、基板との強い相互作用を持っており、気相中の有機金属の電子状態とは大きく異なっている。また、光励起によって基板に生じた電荷と吸着種との間で電荷のやり取りも期待される。Fig. 8に示した如く、ALEにおいて光を照射しないと一原子層成長/1サイクルの成長速度でプラトーは出てこないが光が照射される事によりプラトーが出現する。この結果は光が単純な熱効果で無いことを示しており、光による吸着TMGのAs原子面上での選択

Fig.13 Growth rate of GaAs vs. the laser power density as a function of the laser wavelength.

分解反応を仮定することによりよく説明できた⁵¹⁾。Fig. 13は種々の波長での成長速度の光強度依存性を示している。熱効果しか期待できない長波長励起 ($1.064\mu\text{m}$) ではプラトーは出てこないが、可視域励起ではプラトーが出現し、何らかの表面反応が起こっていると考えられる。如何なる表面反応が起こっているか不明な所が多いが、大きく分けて2つの可能性がある。1つは基板に吸着された光が電子、正孔対を表面に大量に生成し、それが吸着分子種に電荷移動して吸着の分解を促進するとするものである。吸着TMGに電荷移動が起こるとTMGは分解しやすくなることは津田らの計算により示されている¹¹²⁾。もしこの様な機構が働いているなら、基板の種類により成長速度が変わるであろうと予想され、その実験が試みられた。その結果n型基板の方が、p型基板やノンドーブ基板より成長が早いことが観測されている^{32,38)}。しかし、CVDの場合、堆積が進むと表面での反応は基板より成長膜の性質によって、影響されるようになり基板依存性を明らかにする明確な実験は難しい。また、表面反応機構のもう1つの可能性は吸着種自身による光の吸収分解である。可視域励起の場合、通常有機金属ガスの吸収は紫外域に

あるため直接の吸収は考えにくいだが、吸着種はFig. 14に示すように、吸収が長波長に延びている場合が多い¹¹³⁾。これは、可視域でも直接吸収による分解の可能性があることを示している。Fig. 15はAlAsのALEの実験結果である¹¹⁴⁾。AlAsでもGaAsと同様、可視光励起によりALEが実現されている事が分かる。AlAsでの光ALEはAlAsが可視光域に光吸収を持たないため、AlAsでの光ALEの実現は吸着種による直接光吸収分解を示唆している。ちなみに、AlAsでは光の照射なしにはALEは実現できない。

光を当てた場合、以上述べた吸着種の分解速度の変化と同時に先にも述べた通り吸着、脱離の速度も光によって変化すると考えられ、光CVDの機構は複雑である。可視光域励起の場合は気相反応は考える必要がないため、少しは単純化されているが、エキシマー励起の場合、気相反応、並びにパルス励起からくる瞬間的な高い温度上昇についても注意を払う必要がある。

3. おわりに

レーザーCVDについてその特長を整理し、それに関連した実験結果をGaAsのレーザーエピタキシーを中心に述べた。また、レーザーCVD

Fig.14 Absorption spectrum of gas phase DMCd (dimethyl Cd) and adsorbed DMCd on SiO_2 .

Fig.15 Growth rate per cycle of AlAs as a function of TEA flux at 350°C of the growth temperature.

Dの機構についても少し触れた。

この分野は表面並びに表面での反応制御といった化学、物理学、工学の分野でのまだ未知の領域を背景に持っており興味深い。近い将来、表面での反応が完全に制御された形でCVDが実現していくものと期待され今後の発展が楽しみである。現在のレーザーは先にも述べた通り

紫外での高出力・可変波長、CW、或は、より短波長で働くレーザーなどの要求に対して、不十分であり、この方向でのレーザー開発も重要である。また、レーザーの特質であるコヒーレンス、高輝度、極短パルス、高分解スペクトル、高出力等を十分生かしたCVDが登場することを期待したい。

参考文献

- 1) J. Nishizawa, *J. Metals* **25** (1961) 149.
- 2) J. Nishizawa, *J. Metals* **25** (1961) 177.
- 3) M. Kumagawa, H. Sunami, T. Terasaki, J. Nishizawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **7** (1968) 1332.
- 4) R. G. Friser, *J. Electrochem. Soc.*, **115** (1968) 401.
- 5) W. R. Cannon, S. C. Danforth, J. H. Flint, J. S. Haggerty and R. S. Marra, *J. Ame. Ceramic Society* **65** (1981) 324.
- 6) T. Yamazaki, T. Ito, H. Ishikawa, *Symp. on VLSI Tech.*, (1984) 56.
- 7) K. Suzuki, D. Lubben, J. E. Greene, *J. Appl. Phys.* **58** (1985) 979.
- 8) Y. S. Liu, C. P. Yakymyshyn, H. R. Philipp, H. S. Cole, L. M. Levinson, *J. Vac. Sci. Technol.* **B3** (5) (1985) 1441.

- 9) 石谷, 伊藤, 秋季応用物理学会講演予稿集, 2P-W-11, 1985.
- 10) 目黒, 井出, 中原, 伊藤, 田代, 秋季応用物理学会講演予稿集, 2-P-W-12, 1985.
- 11) A. Yamada, S. Nishida, M. Konagai, K. Takahashi, Ext. Abs. of the 1986. *Int. Conf. Solid State Devices and Materials*, Tokyo, (1986) 217.
- 12) T. Yamazaki, R. Sugino, T. Ito, H. Ishikawa, Ext. Abs. of the 1986. *Int. Conf. Solid State Devices and Materials*, Tokyo (1986) 211.
- 13) N. Matsukura and Y. Machi, Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 544.
- 14) K. Kumata, U. Itoh, Y. Toyoshima, N. Tanaka, H. Anzai, A. Matsuda, Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 1380.
- 15) S. Nishida, T. Shimoto, A. Yamada, S. Karasawa, M. Konagai, K. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **49** (1986) 79.
- 16) T. Taguchi, M. Morikawa, Y. Hiratsuka K. Toyoda, Appl. Phys. Lett. **49** (1986) 971.
- 17) R. E. Rocheleau, S. S. Hegedus, W. A. Buchanan, S. C. Jackson, Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 133.
- 18) Y. Toyoshima, K. Kumata, U. Ito, A. Matsuda, Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1925.
- 19) D. H. Lowndes, D. B. Geohegan, D. Eres, S. J. Pennycook, D. N. Mashburn and G. E. Jellison, Jr, Appl. Phys. Lett. **52** (1988) 1868.
- 20) W. Roth, H. Schumacher, H. Beneking, Elector. Lett., **19** (1983) 142.
- 21) W. Roth, H. Beneking, A. Krings, H. Rautk, et al., Micro. J. **15** (1984) 26.
- 22) J. Nishizawa and Y. Kokubun, Ext. Abs. of the 16th SSDM Kobe 1984, (1984) 1-4.
- 23) N. Pütz, H. Heinecke, E. Veuhoff, G. Arens, M. Heyen, H. Lüth, P. Balk, J. Cryst. Growth, **68** (1984) 194.
- 24) Y. Aoyagi, S. Masuda, S. Namba, A. Doi, Appl. Phys. Lett., **47** (1985) 95.
- 25) J. Nishizawa, H. Abe, T. Kurabayashi, "Molecular Layer Epitaxy", J. Electro. Chem. Soc., **132** (1985) 1197.
- 26) J. Nishizawa, Y. Kokubun, H. Shimawaki, M. Koike, J. Nishizawa, J. Electro. Chem. Soc. **132** (1985) 1939.
- 27) V. M. Donnelly, D. Brassen, A. Appelbaum, M. Geva, J. Appl. Phys., **58** (1985) 2022.
- 28) J. Haigh, J. Vac. Sci. Technol. **B3** (5) (1985) 1456.
- 29) Steven P. Kowalczyk and D. L. Miller, J. Vac. Sci. Technol. **B3** (5) (1985) 1534.
- 30) V. M. Donnelly, 1985 *DRY PROCESS SYMPOSIUM*, I-1.
- 31) S. M. Bedair, J. K. Whisnant, N. H. Karam, M. A. Tischler, T. Katsuyama, Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 174.
- 32) A. Doi, Y. Aoyagi, S. Namba, Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 1787.
- 33) A. Doi, Y. Aoyagi, S. Namba, Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 785.
- 34) N. H. Karam, N. A. El-Masy, S. M. Bedair, Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 880.
- 35) J. Nishizawa, T. Kurabayashi, H. Abe, N. Sakurai, J. Electro. Chem., **134** (1986) 945.
- 36) Y. Aoyagi, M. Kanazawa, A. Doi, S. Iwai, S. Namba, J. Appl. Phys. **60** (1986) 3131.
- 37) J. Nishizawa, H. Abe, T. Kurabayashi, N. Sakurai, J. Vac. Sci. Technol. **A4** (3) (1986) 706.
- 38) P. Bali, H. Heinecke, N. Pütz, C. Plass and H. Lüth, J. Vac. Sci. Technol. **A4** (3) (1986) 711.
- 39) V. M. Donnelly, D. Brassen, A. Appelbaum, M. Geva, J. Vac. Sci. Technol. **A4** (3) (1986) 716.
- 40) C. Juang, S. K. Dubey, T. M. Wiseman A. Jones, J. Vac. Sci. Technol. **A4** (3) (1986) 728.
- 41) H. Kukimoto Y. Ban, H. Komatsu, M. Tachechi, M. Ishizaki, J. Crys. Growth, **77** (1986) 223.
- 42) S. M. Bedair, J. K. Whisnant, N. H. Karam, D. Griffis, N. A. El-Masry, H. H. Stadelmaier J. Cryst. Growth **77** (1986) 229.
- 43) Y. Ban, M. Takechi, M. Ishizaki, H. Murata, H. Kukimoto, *Proc. of 4th Conf. on Semi-Insulating III-V Materials* Hakone, 1986. "Semi-Insulating III-V Materials" Ohmsa, (1986) 521.
- 44) Y. Ban, M. Takechi, M. Ishizaki, H. Murata, H. Kukimoto, J. J. Appl. Phys., **25** (1986) L967.
- 45) H. Kukimoto, Ext. Abs. of the 1986 *Intl. Conf. on Solid State Devices and Materials*, Tokyo, (1986) 423.
- 46) 清沢昭雄, 小口信行, 高橋 聡: "光励起MBE法によるGaAsの結晶成長" 33回応用物理学会(春) 予稿集1986 (1986) 719.
- 47) P. Balk, M. Fischer, D. Grundmann, R. Luckerath, H. Lüth W. Richter, J. Vac. Sci. Technol. **B5** (5) (1987) 1453.
- 48) V. M. Donnelly, V. R. McCrary, A. Appelbaum D. Brassen, W. P. Lowe, J. Appl. Phys. **61** (4) (1987) 1410.

- 49) K. Kimura, S. Horiguchi, K. Kamon, M. Shimazu, M. Mashita, M. Mihara, M. Ishii, J. J. Appl. Phys., **26** (1987) L200.
- 50) Y. Aoyagi, A. Soi, S. Iwai, S. Namba, J. Vac. Sci. Technol., **B5** (1987) 1460.
- 51) R. Solanski, U. Sudarsan, J. C. Johnson, Appl. Phys. Lett., **52** (1988) 919.
- 52) S. N. Maximousky, I. P. Revocatova M. A. Selezneva, J. Cryst. Growth, **52** (1981) 141.
- 53) W. E. Johnson, L. A. Schlie, Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 798.
- 54) S. J. C. Irvine, J. Crys. Growth, **68** (1984) 188.
- 55) H. Ando, H. Inuzuka, M. Konagai, K. Takahashi, J. Appl. Phys. **58** (1985) 802.
- 56) S. J. C. Irvine, J. M. Mullin, Ext. Abst. 17th Conf. SSDM Tokyo (1985) 159.
- 57) S. J. C. Irvine, J. Giess, J. B. Mullin, G. W. Blackmore, O. D. Dosser, J. Vac. Sci. Technol. **B3** (5) (1985) 1450.
- 58) J. B. Mullin and S. J. C. Irvine, J. Vac. Sci. Technol. **A4** (3) (1986) 70.
- 59) R. N. Bicknell, N. C. Giles, J. F. Schetzina Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 1095.
- 60) R. N. Bicknell, N. C. Giles, J. F. Schetzina, Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 1735.
- 61) B. J. Morris, Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 867.
- 62) 川久慶人, 佐々木正洋, 広瀬昌彦, 別府達郎 : 33回応用物理学会 (春) 予稿集 1986, (1986) 673.
- 63) S. Hwang, R. L. Harper, K. A. Harris, N. C. Giles, R. N. Bicknell, J. F. Schetzina, D. L. Dreifus, R. M. Kolbas, M. Chu, J. Vac. Sci. Technol. **B6** (2) (1988) 777.
- 64) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr., T. F. Deutsch, Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 946.
- 65) D. J. Ehrlich, R. M. Osgood, Jr., T. F. Deutsch, J. Vac. Sci. Technol., **21** (1) (1982) 23.
- 66) C. R. Jones, F. A. Houle, C. A. Kovac, T. H. Baum, Appl. Phys. Lett. **46** (1985) 97.
- 67) F. A. Houle, C. R. Jones, T. Baum, C. Pico and C. A. Kovac, Appl. Phys. Lett. **46** (1985) 204.
- 68) G. A. West, A. Gupta, Karl W. Beeson, Appl. Phys. Lett. **47** (1985) 476.
- 69) T. H. Baum and C. R. Jones, Appl. Phys. Lett. **47** (1985) 538.
- 70) D. J. Ehrlich and J. Y. Tsao, J. Vac. Sci. Technol. **A3** (3) (1985) 904.
- 71) T. H. Baum, C. R. Jones, J. Vac. Sci. Technol. **B4** (5) (1986) 1187.
- 72) M. P. Irioo, K. L. Kompa, Appl. Phys. **183** (1982) 1327.
- 73) K. Kitahama, K. Hirata, H. Nakamatsu, S. Kawai, N. Fujimori, T. Imai, H. Yoshino, A. Doi, Appl. Phys. Lett. **49** (1986) 634.
- 74) 北浜克熙, 平田和彦, 河合七雄, 藤森直治, 今井貴浩 : 第1回ダイヤモンドシンポジウム講演要旨集 (1986) 27.
- 75) 森川政人, 平塚保幸, 田口俊弘, 豊田浩一, 第33回応用物理学会講演予稿集 (1986) 222.
- 76) 森川政人, 平塚保幸, 田口俊弘, 豊田浩一 : 第47回応用物理学会講演予稿集 (1986) 276.
- 77) P. K. Boyer, G. A. Roche, W. H. Richter, G. J. Collins, Appl. Phys. Lett., **40** (1982) 716.
- 78) R. Solanski, G. J. Collins, Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 662.
- 79) R. Solanski, W. H. Richter, G. J. Collins, Appl. Phys. Lett., **43** (1983) 454.
- 80) V. M. Donnelly, M. Geva, J. Long, R. F. Karlicek, Appl. Phys. Lett., **44** (1984) 951.
- 81) Y. Hirota, O. Mikami, Electronics Letters, **21** (1985) 77.
- 82) A. Tate, K. Jinguji, T. Yamada, N. Takato, J. Appl. Phys. **59** (1986) 932.
- 83) S. Nishino, H. Honda, H. Matsunami, Jpn. J. Appl. Phys., **25** (1986) L87.
- 84) A. Tate, K. Jinguji, T. Yamada, N. Takato, J. Appl. Phys. **59** (1986) 932.
- 85) H. Demiryont, L. R. Thomson, G. J. Collins, J. Appl. Phys., **59** (1986) 3235.
- 86) C. Arnone, M. Rothschild, J. G. Black, D. J. Ehrlich, Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 1018.
- 87) J. M. Jasinski, B. S. Meyerson, T. N. Nguyen, J. Appl. Phys., **61** (1987) 431.
- 88) K. Inoue, N. Michimori, M. Okayama, Y. Hamakawa, Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) 805.
- 89) P. K. Boyer, G. A. Roche, W. H. Richter, G. J. Collins, Appl. Phys. Lett., **40** (1982) 716.
- 90) R. Solanski, G. J. Collins, Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 662.
- 91) R. Solanski, W. H. Richter, G. J. Collins, Appl. Phys. Lett., **43** (1983) 454.
- 92) V. M. Donnelly, M. Geva, J. Long, R. F. Karlicek, Appl. Phys. Lett., **44** (1984) 951.
- 93) Y. Hirota, O. Mikami, Electronics Letters, **21** (1985) 77.
- 94) A. Tate, K. Jinguji, T. Yamada, N. Takato, J. Appl. Phys. **59** (1986) 932.
- 95) S. Nishino, H. Honda, H. Matsunami, Jpn. J. Appl. Phys., **25** (1986) L87.
- 96) A. Tate, K. Jinguji, T. Yamada, N. Takato, J. Appl. Phys. **59** (1986) 932.
- 97) H. Demiryont, L. R. Thomson, G. J. Collins, J. Appl. Phys., **59** (1986) 3235.

- 98) C. Arnone, K. Rothschild, J. G. Black, D. J. Ehrlich, Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 1018.
- 99) J. M. Jasinski, B. S. Meyerson, T. N. Nguyen, J. Appl. Phys., **61** (1987) 431.
- 100) K. Inoue, M. Michimori, K. Okuyama Y. Hamakawa, "Low Temperature Growth of SiO₂ Thin Film by Double-Excitation Photo-CVD" Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) 805.
- 101) 英 貢：応用物理**32** (1983) 560.
- 102) 河合七雄：化学工学 **49** (1985) 676.
- 103) 英 貢：化学工学 **49** (1985) 711.
- 104) 吉川明彦：材料科学 **22** (1986) 268.
- 105) 小長井誠：材料科学 **22** (1986) 262.
- 106) 元島柄二：表面 **25** (1987) 635.
- 107) 丸山敏郎：ケミカルエンジニアリング (1987) 30.
- 108) 鯉沼彦臣, 川崎雅司：応用物理 **56** (1987) 332.
- 109) 土居功年, 岩井莊八, 青柳克信, 難波 進：日本結晶学会誌 **29** (1987) 319.
- 110) 大西 寛, 星之内進：電子材料 (1988) 978.
- 佐藤博保：表面 **26** (1988) 275.
- 111) 青柳克信：精密工学会誌：**54** (1988) 262.
- 112) N. Tsuda, S. Oikawa, M. Morishita, M. Mashita, Y. Kuniya, Seventh Record of Alloy Semiconductor physics and Electronics Symposium (1988) 41.
- 113) Y. R. Frordevanx, R. P. Salathe, H. H. Cilgen and H. P. Weber, Appl. Phys. **A27** (1982) 133.
- 114) K. Ozeki, T. Meguro, Y. Yamamoto, T. Suzuki, Y. Okano, A. Hirata, Y. Aoyagi, S. Namba, Proceeding on Int. Conf. on Electrical Materials. (1988) 120.
- 115) S. Iwai, A. Doi, Y. Aoyagi, S. Namba, Int-Symp. GaAs and Related Compounds, (1988) 191.