

〔解説〕

窒化物半導体の電子デバイス応用の現状と課題

Current Status and Prospect of the Electronic Device Application of Nitride Semiconductors

奥村 元 吉田 貞史
H. OKUMURA S. YOSHIDA

Based on the recent development of short wavelength optical devices, crystal growth and device processing techniques of III nitride semiconductors have been much improved. These techniques are also applicable for electronic devices. Considering such a situation, current status and prospect of the electronic device application of nitride semiconductors are reviewed.

§ 1 はじめに

III-V族窒化物のデバイス応用は、青色LED、LDに代表されるオプトエレクトロニクスデバイスが主流である。しかし、最近のMOCVD法やMBE法などの結晶成長技術の進展に伴い、電子デバイスを目指した研究も急速に進展しつつある。GaNやAlN等のIII-V族窒化物は、いわゆる軽元素からなるワイドギャップ半導体の1種でその特徴である高い飽和ドリフト速度と高い絶縁破壊電圧を示す上に、III-V族化合物であるためヘテロ構造や混晶の利用が可能である。その結果、IV族、IV-IV族半導体など他のワイドギャップ半導体に比べてより高い移動度が期待でき、高パワー・高温動作という仕様に加えて高周波動作という要求に答えることができる。初期には、GaNを用いてMESFET等の構造が試作されたが、ここ数年III-V族化合物の特性を活かしたHFETやMODFET等の構造で進展が見られている。

本稿では、電子デバイス応用という観点から軽元素ワイドギャップ半導体の特質を紹介し、III-V族窒化物の材料プロセス技術の現状、最近のIII-V族窒化物を用いたデバイス研究の概要を示した後、今後の発展への課題と期待を議論する。

§ 2 電子デバイス応用から見た軽元素ワイドギャップ半導体の特性

現在のエレクトロニクスの根幹はSiやGaAs等の半導体材料によって構築されており、極めて小さく超高速で演算を行うことができる半導体デバイスが作製されている。こ

れら現行のエレクトロニクスで用いられている半導体材料の構成元素は、周期律表の中で第3周期以降に位置するが、第2周期のCやNといった軽元素を含む物質にも半導体の性質を示すものが存在する。C(ダイヤモンド)やSiC、或いはGaN等のIII-V族窒化物がそれで、Si等にはない優れた性質を持っており、従来の材料ではカバーできない領域のエレクトロニクスへの応用が期待されている。

第2周期の元素を含む半導体は、SiやGaAsに比べて一般に結晶の格子定数が小さくバンドギャップが大きいという特徴をもつワイドギャップ半導体である。図1は各種半導体材料をバンド長とバンドギャップの観点からプロットしたものであるが、SiCやGaNはSiで代表される一群とは大きくかけ離れていることがわかる。小さい格子定数は原子間の結合が強いことを意味し、その結果軽元素ワイドギャップ半導体材料は化学的安定性が極めて高い。また強い原子間結合エネルギーと構成元素の軽い質量は、高いフォノンエネルギーを介して熱伝導度・飽和ドリフト速度等が高いという物性をもたらす。一方、バンドギャップが大きいとアバランシェ効果が起こりにくくなり、絶縁破壊電圧が高くなる。

近年、Si等ではこれらの物性値が十分ではないために本質的にその適用が困難となる応用分野が顕在化してきた。高温動作素子、高パワー素子、高周波素子等の分野で、エンジン制御・電力変換・移動体通信など産業界から大きなニーズがあるにもかかわらず、Si等の材料を用いている限り本質的な進展は望めないのではないかと懸念されている^{1,2)}。たとえばSi素子の場合、動作温度は150程度が限界でエンジン近傍での使用は不可能であるし、移動体通信におけるGaAs高周波デバイスも高出力動作時の信頼

KEY WORDS : 族窒化物半導体, 電子デバイス, ワイドギャップ半導体

Table 1 Properties of Si, GaAs and several wide bandgap semiconductors at room temperature.

	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	GaN	diamond
禁制帯幅(eV) E_g	1.11	1.43	2.20	2.86	3.39	5.47
絶縁破壊電圧(V/cm) E_b	3×10^5	4×10^5	4×10^6	2.5×10^6	2.0×10^6	3.5×10^6
電子飽和ドリフト速度(cm/s) V_s	1.0×10^7	2.0×10^7	2.7×10^7	2.0×10^7	2.7×10^7	2.5×10^7
電子移動度(cm^2/Vs) μ_n	1500	8500	800	450	900	1800
正孔移動度(cm^2/Vs) μ_p	450	420	70	10	400	1600
熱伝導率(W/cm deg) κ	1.51	0.54	4.9	4.9	1.3	20.9
誘電率 ϵ_0	11.4	12.9	9.7	10.0	10.4	5.9
誘電率 ϵ_∞	11.6	11.1	6.5	6.7	5.4	5.8

Table 2 Definitions of high-power and high frequency figures of merit, and their relative values for several semiconductors.

	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	GaN	diamond
JFM	1.0	11	110	260	410	790	5330
KFM	1.0	0.45	5.8	5.1	5.1	1.8	31
BFM	1.0	28	40	90	290	910	14860
BHFM	1.0	16	12	13	34	100	1080
QF1	1.0	9.4	130	300	950	910	198100
QF2	1.0	16	550	2440	9630	10300	5784410
QF3	1.0	28	40	90	290	910	14860

Johnson 指数	$JFM = E_b V_s / 2\pi f$	高周波×パワー性能
Keyes 指数	$KFM = \mu_n V_s / 4\pi f V$	高周波動作時の熱的限界
Baliga 指数	$BHFM = \epsilon \mu_n E_g^2$ $BFM = \mu_n E_b^2$	パワージェットの通電ロス (高周波動作)
Baliga 高周波指数	$BHFM = \mu_n E_b^2$ $(\mu_n - \mu_p) E_b E_g^2$	パワー FET のスイッチングロス (高周波動作)
Shenai 指数	$QF1 = \kappa n_s$ $QF2 = \kappa \mu_n E_b$ $QF3 = n_s - \mu_p E_b^2$	素子のパッシブインジパワ

性に問題がある。

Table 1 に半導体材料がこれらの分野に適しているか否かを表す各種材料の物性値を示すが、ワイドギャップ半導体材料の値は Si や GaAs とはずいぶん違っていることがわかる。実際のデバイス応用に際しては、これらの物性値を組み合わせたいわゆる性能指数(figure of merit)が従来から提案されている³⁻⁷⁾。高周波パワーデバイスとしての性能を表す Johnson 指数³⁾、高速高集積デバイスの性能についての Keyes 指数⁴⁾などがあり、Table 2 にこれらの性能指数を示す。ワイドギャップ半導体の特性指数値は Si の数百倍にもなり、ワイドギャップ半導体をベースにしたエレクトロニクスを構築できれば、その材料物性の優位性から大きなブレークスルーが生まれると期待されるわけであ

る。この中で、III 族窒化物半導体は Johnson 指数や Baliga 指数⁵⁾、Baliga 高周波指数⁶⁾で大きな値を持ち、特に高パワー高周波の分野で優位性を発揮できるものと考えられる。

一方、原子間の結合が強いという性質のため、ワイドギャップ半導体は融点が高く合成するのが難しい。ワイドギャップ半導体の材料物性やデバイス応用の研究が今まで遅れていた原因の一つが、結晶成長の困難さであるといえる。しかし、最近の結晶成長技術の進歩の結果、これらワイドギャップ半導体の高品質結晶が得られるようになり、デバイス応用を想定した研究を可能とする技術レベルに到達してきたと考えられる。

III族窒化物の電子デバイス応用を考えた場合、絶縁膜が極めて重要な項目の一つとして挙げられる。言うまでもなく、SiのMOSテクノロジーの成功は良好なSiO₂絶縁膜によるところが大きい。GaAsに対しては、このような良好な絶縁膜として働く材料が見つからないが、III族窒化物に対しては同族であるAlNを絶縁膜として用いることができる。その上、AlNはGaNやその混晶の上にエピ成長させることが可能で、界面準位や固定電荷の少ない極めて良好な絶縁膜となる可能性がある。実際、III族窒化物に対してではないが、AlN/Siという構造が調べられており、トラップ濃度10¹¹/eVcm²という良好な値³⁶⁾が報告されている他、格子不整合の極めて少ないAlN/SiCの組み合わせに対して絶縁膜の評価が行われている^{37, 38)}。

§ 4 III族窒化物半導体による電子デバイス研究の現状

上記のような材料プロセス技術に立脚して、1991年以来各種のデバイス構造が試作され、III族窒化物半導体を用いたデバイス研究も徐々に進展してきている。以下のその概要を示す。

1. MESFET

MOVPE法によるノンドープn型GaN層を用いてMESFETが試作されている^{39, 40)}。ゲート長数 μm のもので20mS/mm程度の g_m が出ており、Binari等⁴⁰⁾は高周波特性に関しても $f_{\text{max}}=17\text{GHz}$ を報告している。

2. HFET

HFETに関しては、米国APA Opticsよりいくつかの報告が1994年以降なされている⁴¹⁻⁴³⁾。まずMOVPEによるAlGaIn/GaN($x=0.13$)ヘテロ構造を用いてゲート長0.25 μm 程度のHFETが試作され $g_m=27\text{mS/mm}$ 、 $f_{\text{max}}=35\text{GHz}$ が得られた⁴¹⁾。またその高温での特性も調べられ、室温での $f_{\text{max}}=70\text{GHz}$ が300 $^{\circ}\text{C}$ で $f_{\text{max}}=4\text{GHz}$ となると共にshunt conductanceが増加することが観測された⁴²⁾。更にエンハンスメント型のHFETも試みられ、それを用いてインバータ回路が実証されている⁴³⁾。

3. MODFET

AlGaIn/GaN系に対する2次元電子ガスの存在は、移動度の顕著な増大という形で1991年にKhan等によって初めて報告された⁴⁴⁾。その後シュブニコフ・ド・ハース振動や量子ホール効果も確認され⁴⁵⁾、低温で数1000cm²/Vsの移動度と10¹²~10¹³/cm²オーダーのシートキャリア濃度が実現するに至っている⁴⁶⁻⁴⁹⁾。

これらの2次元電子ガスを用いたMODFETは1993年にKhan等によって実現された⁵⁰⁾。その時の特性は、4 μm ゲート長で $g_m=27\text{mS/mm}$ (r.t.), 46mS/mm(77K)程度であったが、その後いくつかのグループからMODFET試作の報告が相次ぎ、特性が向上してきている⁵¹⁻⁵⁷⁾。ゲート長数 μm の構造で g_m が186mS/mm、最大ドレイン電流密度0.49A/mm⁵⁵⁾、 $f_{\text{max}}=77.5\text{GHz}$ ⁵³⁾、ブレイクダウン電圧340V⁵⁶⁾等の値が1996年までに報告されている。また、MODFETの高温特性も調べられており、 g_m が300 $^{\circ}\text{C}$ で室温の1/3程度になることが観測されている⁵⁷⁾。これらのMODFETの報告の内、いくつかはMBE法によって作製された構造であることは注目すべきであろう。更に、1996年以降も特性が向上し、ダブルヘテロチャンネルを用いて g_m で270mS/mm、最大ドレイン電流密度1.1A/mm⁵⁸⁾、ドープチャンネルの構造で30GHz以上の f_T 、80GHzを越える f_{max} が報告されている^{59, 60)}。また、高周波パワーデバイスとしての特性も調べられるようになっており、CWパワーとして10GHzで~0.3W/mm⁶¹⁾が報告されたのを皮切りに1W/mmを越えるものの報告が続いている⁶²⁻⁶⁶⁾。パワーデバイスとして特性からは、サファイア基板の熱拡散の問題が提起されており、最近では熱伝導率の良いSiC基板上のデバイス構造を用いて出力1W以上のものが実現されている⁶⁷⁻⁶⁹⁾。一方更なる高移動を実現するため、チャンネル層にInGaInを用いる試みもある。

4. HBT

III-V族窒化物を用いたHBTとして、GaIn/SiC構造がPankove等によって報告されている^{29, 70)}。エミッタの効率の向上をワイドギャップ材料をエミッタに用いることで実現しようとしたもので、SiC及びGaInの材料としての利点を組み合わせたものといえる。電流利得として10,000,000、電流密度1,000A/cm²という極めて大きな値が報告されている。高温でも535 $^{\circ}\text{C}$ までの動作を確認した

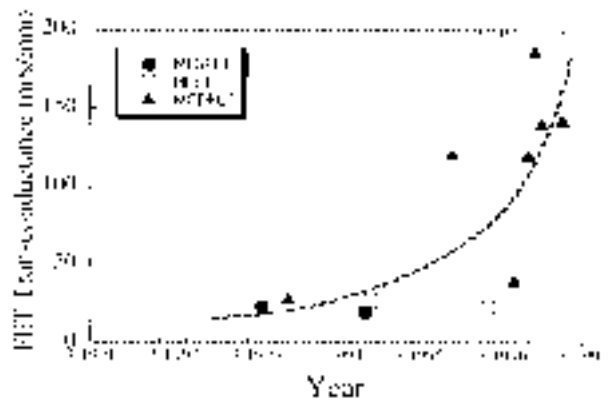


Fig. 2 Improvement of g_m values for FETs fabricated with III-nitrides.

とのことである。また、最近ではAlGaIn/GaN構造のHBTも試作され、電流利得3、ソフトブレイクダウン50Vという値が報告されているが⁷¹⁾、素子構造や作製プロセスにまだまだ改善の余地が有ると考えられる。

§ 5 窒化物半導体による電子デバイスの今後の展開とその課題

Fig.2 に窒化物FETの g_m の報告値の進展を示す。ここ数年のIII-V族窒化物による電子デバイス研究の進展は著しい。しかし、ヘテロ構造作製手法の高度化や電極・エッチング等のデバイスプロセス技術の点で改善すべきものがまだまだ多く残っており、まだまだ特性向上の余地が残されていると考えられる。

一方、デバイス応用を考える上でIII族窒化物に特有の問題もいくつか存在する。まず、混晶・ヘテロ構造を設計する上で最も重要なパラメーターであるバンドオフセット値に関して、数例報告があるものの相反する結果が報告されており⁷²⁻⁷⁶⁾、その系統的な研究が望まれる。また、通常成長に用いられるサファイア基板の場合、基板/エピ膜界面から $10^8 \sim 10^{10}/\text{cm}^2$ もの極めて多くの転位が発生する。光デバイスの場合、これらの転位はデバイス特性に大きな影響は与えないようであるが、電子デバイスの場合には耐圧等の点で大きな障害となりうる。このため、格子不整合の小さい基板材料の開発がより重要となると考えられる。最近、サファイア基板上成長膜の上にストライプ状の選択成長を経て横方向成長(Epitaxial Lateral Over Growth: ELOG)を施し、更にその上にHVPE法、或いはMOCVD法によって作製したホモエピタキシャル膜で、転位密度の大幅な低減が達成されている⁷⁷⁻⁷⁸⁾。

ところで、III族窒化物は通常六方晶の結晶構造をとるが、それに起因していくつかの問題が生じる。Fig.3 に示すような結晶中のらせん転位の単位長あたりの弾性エネル

ギーEは、 $E \sim G b^2 1/n(R/r_0)$ の関係にある。ここで、Gは弾性定数、bはバーガースベクトルの大きさであるが、らせん転位の場合bは転位方向の格子定数の整数倍となる。六方晶結晶ではc軸の長さが一般的に長く、bとして最も小さいユニットセル長をとっても、立方晶結晶に比べてEが大きくなる傾向を持つ。このEがある値を越えたららせん転位の中心には結晶が存在できず、孔があくことになる。すなわち、六方晶結晶のc面上成長では、らせん転位に付随して結晶中にパイプ状の孔が生成しやすいことを意味する。この欠陥は、c軸長がより長いSiC結晶においてマイクロパイプとして知られており、六方晶結晶にある意味では共通の欠陥といえる。最近、サファイアc面上MOVPE成長のGaNエピタキシャル膜にも、同様の欠陥が発見された^{79,80)}。その大きさは直径10nm程度でSiCのマイクロパイプに比べるとかなり小さいが、 $10^5 \sim 10^7/\text{cm}^2$ の密度で存在しており、デバイス構造を集積化した場合、深刻な問題となる可能性がある。

また、六方晶結晶は立方晶に比べて、結晶の対称性が低く移動度や有効質量などの物性に異方性が生じる。更に、(0001)面成長膜では成長膜の格子が緩和していなければ歪みによりピエゾ電場が発生する⁸¹⁾。その大きさは大まかな見積もりで $\text{Al}_{0.1}\text{GaN}_{0.9}/\text{GaN}/\text{Al}_{0.1}\text{GaN}_{0.9}$ 構造に対し $10^5 \sim 10^7 \text{ V/cm}$ ($1 \sim 10 \text{ mV}/\text{\AA}$)にも達する。Siに代表される立方晶結晶の場合と異なり、これらの効果によってデバイス特性に影響がでると思われるが、その検討はまだなされていない。六方晶の結晶多型である立方晶結晶⁸²⁾を用いればそのような心配はなくなるが、立方晶結晶の品質は六方晶に比べてまだまだ劣っているのが現状である。あるいは、適切なデバイス構造を導入することによって、六方晶結晶でこれらの効果を積極的に利用することが可能かもしれない。

参 考 文 献

- 1) 吉田貞史: パリティ 11(1996)25.
- 2) 吉田貞史: 電子情報通信学会誌 79(1996) 1219.
- 3) E. O. Johnson: RCA Rev. 2 (1965) 163
- 4) R. W. Keyes: Proc. IEEE 60 (1972) 225.
- 5) B. J. Baliga, J. Appl. Phys. 53 (1982) 1759.
- 6) B. J. Baliga, IEEE Electron Device Lett. 10 (1989) 455.
- 7) K. Shenai, R. S. Scott, B. J. Baliga, IEEE Trans. Electron Devices 36 (1989) 1811.
- 8) I. Grzegory, J. Jun, M. Bockowski, St. Krukowski, M. Wroblewski, B. Lucznik, S. Porowski, J. Phys. Chem. Solids 56 (1995) 639.
- 9) S. Kurai, Y. Naoi, T. Abe, S. Ohmi, S. Sakai: Jpn. J. Appl.

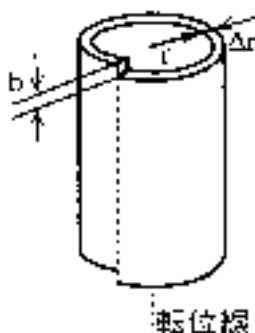


Fig.3 Structure of a pipe-like defect along a screw dislocation.

- Phys. 35 (1996) L77.
- 10) R. J. Molnar, P. Maki, R. Aggarwal, Z. L. Liao, E. R. Brown, I. Melngailis, W. Götz, L. T. Romano, N. M. Johnson: *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 423 (1996) 221.
- 11) S. Nakamura, T. Mukai, S. Senoh: *J. Appl. Phys.* 71 (1992) 5543.
- 13) S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* 30 (1991) L1708.
- 14) S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh, T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 (1992) L1258.
- 15) M. E. Lin, G. Xue, G. L. Zhou, J. E. Greene, H. Morkoç: *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 932.
- 16) C. Wang, R. F. Davis: *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 990.
- 17) O. Brandt, H. Yang, H. Kostial, K. Ploog: *Appl. Phys. Lett.* 69 (1997) 2707.
- 18) F. Bernardini, V. Fiorentini, A. Bosin: *Appl. Phys. Lett.* 70, 2990 (1997).
- 19) S. J. Pearton, C. R. Abernathy, F. Ren, J. R. Lothian, P. W. Wisk, A. Katz: *J. Vac. Sci. Technol. A* 11 (1993) 1772.
- 20) M. E. Lin, Z. F. Fan, Z. Ma, L. H. Allen, H. Morkoç: *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 887.
- 21) K. V. Vassilevski, V. E. Sizov, A. I. Babanin, Yu. V. Melnic, A. S. Zubrilov: *Inst. Phys. Conf. Ser.* 142 (1996) 1027.
- 22) I. Adesida, a. Mahajan, M. Andideh, M. A. Khan, D. T. Olsen, J. N. Kuznia: *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 2777.
- 23) H. Morkoç, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov, M. Burns: *J. Appl. Phys.* 76 (1994) 1363.
- 24) J. S. Foresi, T. D. Moustakas: *Appl. Phys. Lett.* 62 (1993) 2859.
- 25) M. A. Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, D. T. Olsen: *Appl. Phys. Lett.* 62 (1993) 1786.
- 26) M. E. Lin, Z. Ma, F. Y. Huang, Z. F. Fan, L. H. Allen, H. Morkoç: *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 1003.
- 27) Z. Fan, S. N. Mohammad, W. Kim, O. Aktas, A. E. Botchkarev, H. Morkoç: *Appl. Phys. Lett.* 68 (1996) 1672.
- 28) S. Nakaumura, T. Mukai, M. Senoh: *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 1687.
- 29) J. Pankove, S. S. Chang, H. C. Lee, R. J. Molnar, T. D. Moustakas, B. van Zeghbroeck: *Tech. Dig. Int. Electron Devices Meeting 1994* (1994) 389.
- 30) J. D. Guo, M. S. Feng, R. J. Guo, F. M. Pan, C. Y. Chang: *Appl. Phys. Lett.* 67 (1995) 2657.
- 31) L. Wang, M. I. Nathan, T-H. Lim, M. A. Khan, Q. Chen: *Appl. Phys. Lett.* 68 (1996) 1267.
- 32) H. Morkoç: *Proc. Int. Symp. Blue Laser and Light Emitting Diodes* (Chiba, Japan, 1996) 23.
- 33) Q. Z. Liu, L. S. Yu, S. S. Lau, J. M. Redwing, N. R. Perkins, T. F. Kuech: *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 1275.
- 34) T. Mori, T. Kozawa, T. Ohwaki, Y. Yagi, S. Nagai, S. Yamasaki, S. Asami, N. Bhibata, M. Koike: *Appl. Phys. Lett.* 69 (1996) 3537.
- 35) V. A. Dmitriev, K. G. Irvine, C. H. Carter, Jr., N. I. Kuznetsov, E. V. Kalinina: *Appl. Phys. Lett.* 68 (1996) 229.
- 36) K. S. Stevens, M. Kinniburgh, A. F. Schwartzman, A. Ohtani, R. Beresford: *Appl. Phys. Lett.* 66 (1995) 3179.
- 37) C.-M. Zetterling, M. Östling, N. Nordell, O. Schön, M. Deschler: *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 3549.
- 38) C.-M. Zetterling, M. Östling, C.I. Harris, N. Nordell, K. Wongchotigul, M.G. Spencer: *Mat. Sci. Forum* 264-268 (1998) 877.
- 39) M.A.Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, D. T. Olsen: *Appl. Phys. Lett.* 62 (1993) 1786.
- 40) S.C.Binari, L. B. Rowland, W. Kruppa, G. Kelner, K. Doverspike, D. K. Gaskill: *Electronics Lett.* 30 (1994) 1248.
- 41) M.A.Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olsen, W. J. Schaff, J. W. Burm, M. S. Shur: *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 1121.
- 42) M.A.Khan, M. S. Shur, J. N. Kuznia, Q. Chen, J. Burm, W. Schaff: *Appl. Phys. Lett.* 66 (1995) 1083.
- 43) M.A.Khan, Q. Chen, C. J. Sun, J. W. Yang, M. S. Shur, H. Park: *Appl. Phys. Lett.* 68 (1996) 514.
- 44) M.A.Khan, J. M. van Hove, J. N. Kuznia, D. T. Olsen: *Appl. Phys. Lett.* 58 (1991) 2408.
- 45) M.A.Khan, J. N. Kuznia, J. M. van Hove, N. Pan, J. Carter: *Appl. Phys. Lett.* 60 (1992) 3027.
- 46) M.A.Khan, Q. Chen, C. J. Sun, M. Shur, B. Gelmont: *Appl. Phys. Lett.* 67 (1995) 1429.
- 47) J.M.Redwing, M. A. Tischler, J. S. Flynn, S. Elhamri, M. Ahoujja, R. S. Newrock, W. C. Mitchel, : *Appl. Phys. Lett.* 69 (1996) 963.
- 48) C. F. Lin, H. C. Cheng, J. A. Huang, M. S. Feng, J. D. Duo, G. C. Chi: *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 2583.
- 49) P. M. Asbeck, E. T. Yu, S. S. Lau, G. J. Sullivan, J. Van Hove, J. Redwing: *Electron. Lett.* 33 (1997) 1230.
- 50) M.A.Khan, A. Bhattarai, J. N. Kuznia, D. T. Olsen: *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 1214.
- 51) A.Özgür, W. Kim, Z. Fan, A. Botchkarev, A. Salvador, S. N. Mohammad, B. Sverdlov, H. Morkoç: *Electronics Lett.* 31 (1995) 1389.
- 52) M.A.Khan, Q. Chen, M. S. Shur, B. T. Dermott, J. A. Higgins, J. Burm, W. Schaff, L. F. Eastman: *Electronics Lett.* 32 (1996) 357.
- 53) J.Burm, W. J. Schaff, L. F. Eastman, H. Amano, I. Akasaki:

- Appl. Phys. Lett. 68 (1996) 2849.
- 54) Q. Chen, M. A. Khan, J. W. Yang, C. J. Sun, M. S. Shur, H. Park: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 794.
- 55) Z. Fan, S. N. Mohammad, O. Aktas, A. E. Botchkarev, A. Salvador, H. Morkoç: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1229.
- 56) Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, P. Kozodoy, S. P. Denbaars, U. K. Mishra :Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1438.
- 57) O. Aktas, Z. F. Fan, S. N. Mohammad, A. E. Botchkarev, H. Morkoç: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 3872.
- 58) Z. Fan, C. Lu, A.E. Botchkarev, H. Tang, A. Salvador, O. Aktas, W. Kim, H. Morkoc: Electron. Lett. 33 (1997) 814.
- 59) M. A. Khan, Q. Chen, M. S. Shur, B.T. Dermott, J. A. Higgins, J. Burm, W. J. Schaff, L. F. Eastman: Electron. Lett. 32 (1996) 357.
- 60) M. A. Khan, Q. Chen, J.W. Yang, M.S. Shur, B.T. Dermott, J.A. Higgins: IEEE EDL 17 (1996) 325.
- 61) M. A. Khan, Q. Chen, M. S. Shur, B.T. Dermott, J. A. Higgins, J. Burm, W. J. Schaff, L. F. Eastman: IEEE EDL 17 (1996) 584.
- 62) Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, S. P. DenBaars, U. K. Mishra: IEEE EDL 17 (1996) 455.
- 63) O. Aktas, Z.F. Fan, A. Botchkarev, S.N. Mohammad, M. Roth, T. Jenkins, L. Kehias, H. Morkoc: IEEE EDL 18 (1997) 293.
- 64) Y.-F. Wu, B.P. Keller, S. Keller, N.X. Nguyen, M. Le, C. Nguyen, T.J. Jenkins, L.T. Kehias, S.P. Denbaars, U.K. Mishra: IEEE EDL 18 (1997) 438.
- 65) Y. F. Wu, B. P. Keller, P. Fini, J. Pusi, M. Le, N. X. Nguyen, C. Nguyen, D. Widman, S. Keller, S. P. Denbaars, U. K. Mishra: Electron. Lett. 33 (1997) 1742.
- 66) Y.-F. Wu, B.P. Keller, P. Fini, S. Keller, T.J. Jenkins, L.T. Kehias, S.P. Denbaars, U.K. Mishra: IEEE EDL 19 (1998) 50.
- 67) R. Gaska, Q. Chen, J. Yang, A. Osinsky, M. A. Khan, M. S. Shur: IEEE EDL 18 (1997) 492.
- 68) A. T. Ping, Q. Chen, J. W. Yang, M. A. Khan, I. Adesida: IEEE EDL 19 (1998) 54.
- 69) G. J. Sullivan, M. Y. Chen, J. A. Higgins, J. W. Yang, Q. Chen, R. L. Pierson, B. T. McDermott: IEEE EDL 19 (1998) 198.
- 70) S.S.Chang, J. Pankove, M. Leksono, B. van Zeghbroeck: 53rd DRC (1995) IVB-5.
- 71) P. Kozodoy, S. P. DenBaars, U. K. Mishra: Ext. Abstract 25th Int. Symp. Compound Semiconductors (Nara, Japan, 1998) We2A-1.
- 72) J. Baur, K Maier, M. Kunzer, U. Kaufmann, J. Schneider: Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 2211.
- 73) G. Martin, S. Strite, A. Botchkarev, A. Agarwal, A. Rockett, H. Morkoç, W. R. Lambrecht, B. Segall: Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 610.
- 74) G. Martin, A. Botchkarev, A. Rockett, H. Morkoç: Appl. Phys. Lett. 68 (1996) 2541.
- 75) J. R. Waldrop, R. W. Grant: Appl. Phys. Lett. 68 (1996) 2879.
- 76) S. A. Ding, S. R. Barman, K. Horn, . Yang, B. Yang, O. Brandt, K. Ploog: Appl. Phys. Lett. 70 (1997) 2407.
- 77) A. Kimura, C. Sasaoka, A. Sakai, A. Usui: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 482 (1997) 119.
- 78) C. Sasaoka, H. Sunakawa, A. Kimura, M. Nido, A. Usui, A. Sakai: J. Cryst. Growth 189 (1998) 61.
- 79) W. Qian, G. S. Rohrer, M. Skowronski, K. Doverspike, L. B. Rowland, D. K. Gaskill: Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 2284.
- 80) P. Vennéguès, B. Beaumont, M. Vaille, P. Gibart: Appl. Phys. Lett. 40 (1997) 2434.
- 81) T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, I. Akasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) L382.
- 82) H. Okumura, K. Ohta, G. Feuillet, K. Balakrishnan, S. Chichibu, H. Hamaguchi, P. Hacke, S. Yoshida: J. Cryst. Growth 178 (1997) 113.

(1999.2.12 受付)