

## 大口径化基板対応 (8 インチ×6 枚) 高速成長 MOCVD 装置 (UR26K) の開発

### Development of high growth rate MOCVD system(UR26K) for large diameter substrate(8 inch×6 wafers)

徳永裕樹*	生方映徳**	矢野良樹**	山岡優哉*
TOKUNAGA Hiroki	UBUKATA Akinori	YOSHIKI Yano	YAMAOKA Yuya
田渕俊也*	山口晃*	植松邦全*	内山康右***
TABUCHI Toshiya	YAMAGUCHI Akira	UEMATSU Kunimasa	Uchiyama Kousuke
松本功***			
Matsumoto Kou			

世界的な省エネ化を背景に近年急速に高まりつつある GaN 系電子デバイスの需要に対応すべく、8 インチ×6 枚の処理が可能な世界最大級のリアクタサイズの量産型 MOCVD 装置 (UR26K) を開発した。既設の UR25K (6 インチ×7 枚) により最適化したプロセス条件を経験則に基づくスケール倍則で適用した結果、8 インチシリコン基板上 AlN の膜厚均一性、AlGaIn の組成均一性については、UR25K と遜色ない結果が得られた。

また同様に AlGaIn/GaN ヘテロ接合を有する HEMT 構造を成長し、電気的特性評価を行った結果、シートキャリア濃度  $1.15 \times 10^{13}(\text{cm}^{-2})$ 、移動度;  $1660(\text{cm}^2/\text{Vs})$  を達成した。これは、UR25K の実績を上回る良好な結果である。

We have developed 8inch×6wafers MOCVD reactor (UR26K) for mass-production of GaN based power device that is growing rapidly in recent years. This reactor size is one of the largest. By taking into consideration of an in-house scaling law for UR26K, we have modified the growth condition of the previous model UR25K (6inch×7wafers). As a result, we have obtained uniform AlN film thickness and Al composition distribution of AlGaIn on 8 inch silicon substrate, which are comparable with those of UR25K.

Electrical properties of AlGaIn/GaN HEMT structure are sheet carrier concentration of  $1.15 \times 10^{13}(\text{cm}^{-2})$  and electron mobility of  $1660(\text{cm}^2/\text{Vs})$ . These results were even superior to a smaller scale reactor.

#### 1. はじめに

東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故以降、日本国内は深刻な電力不足に直面しており、節電に直結する電子機器の省エネルギー化やモーター制御のインバータのさらなる高効率化が喫緊の課題となっている。インバータや、電力変換のためのスイッチング素子やダイオードは、Si 系が用いられているが、

更なる損失の低減は物性的な仕様限界に近づいているのが現状である<sup>1)</sup>。

一方でワイドバンドギャップ半導体である GaN や AlN は、Si や GaAs などに比べて禁制帯幅が大きいだけでなく、絶縁破壊電界、電子の飽和ドリフト速度、熱伝導度が高いなどの物性上の特徴を持っており、Si 系パワーデバイスの仕様限界を超えた低損失かつ高耐圧、高周波のショットキーバリアダイオードやトランジスタを実現できる次世代材料の 1 つとして注目されている<sup>2-3)</sup>。

GaN 系パワーデバイスの市場開拓は、まだ始まっ

\* 電子機材事業本部化合物事業部

\*\* 電子機材事業本部事業戦略推進部

\*\*\* 大陽日酸イー・エム・シー株式会社

たばかりである。現在、40-200Vの低耐圧領域に製品の投入が始まったばかりである。ある予測によれば今後、2015年には約3.5億ドルの市場規模に達すると見込まれている。状況によっては今後、その需要が急速に拡大することが期待されている分野である<sup>4)</sup>。

当社でも2010年よりUR25K(6インチ×7枚)を開発し、Si基板上へのAlGaIn/GaN HEMTのプロセス開発を行い、シートキャリア密度;  $1.1 \times 10^{13} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ 、ホール移動度;  $1400 \text{ (cm}^2\text{/Vs)}$ の成果が得られている。また生産性向上に必須のAlN、AlGaInの高速成長、ならびに高抵抗バッファ層に必要なカーボン濃度制御、基板反り制御等に関する基本データも取得した<sup>5)</sup>。Si系デバイスとの競争を考慮すると基板として採用可能な選択肢は大口径Si基板に限られる。エピタキシャル成長プロセスの生産性は基板の口径と処理枚数が大きいほど高く、また成長速度に比例する。このニーズに対応すべく今回、8インチSi基板を同時に6枚の処理が可能なUR26Kを開発し、高速成長を実証する実験を行ったので内容及び結果について報告する。

## 2. UR26K について

UR26Kは6インチ×10枚または、8インチ×6枚を一度に処理することが可能で、現時点では世界最大級のリアクタを有する量産装置である。6インチと8インチの切り替えはサセプタを交換するのみで簡単に切り替え可能な仕様になっている。Fig.1にUR26Kのリアクタ概略図を示す。当社において従来の中小型モデルのSRシリーズより踏襲している3層流ノズルからの原料ガス供給方式を用いている。ギア駆動による自公転システム、抵抗加熱カーボンヒータ等のリアクタ内の基本的な構造は6インチ×7枚を処理するUR25Kを踏襲しており、UR25Kで最適化したプロセス流量条件をスケール倍するだけでUR26Kに適用することが可能である。このときの係数は当社の経験値によるものである。

独立制御可能な6分割カーボンヒータは、流れに対して、その上下流のヒータの電力バランスをコントロールすることで、ウェハプレート面内温度分布傾向を凸型から凹型まで制御することが可能である。Si基板上への成長では室温においてGaNにかかる大きな引張り応力を中和する目的で成長中には圧縮応力をかけた状態で成長させる。このために基板は多くの時間において上に凸に反っている。基板中央部はサセプタから離れた位置に置かれ、中央部の基板表面温度は周囲よりも低くなりがちである。UR26Kでは基板ポケット表面温度の分布を凹凸に自由に制御できること

から、反った条件においても基板表面温度を均一に制御あうことが可能である。

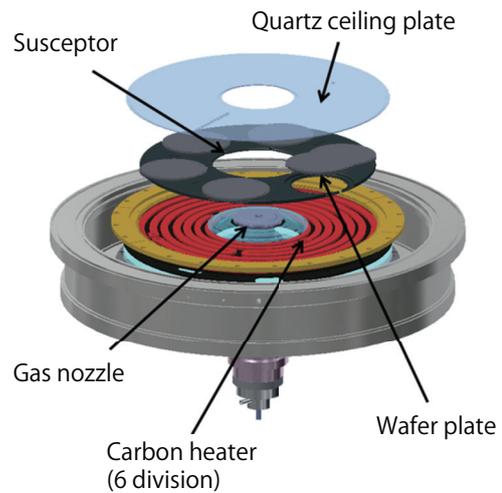


Fig.1 Schematic drawing of UR26K reactor

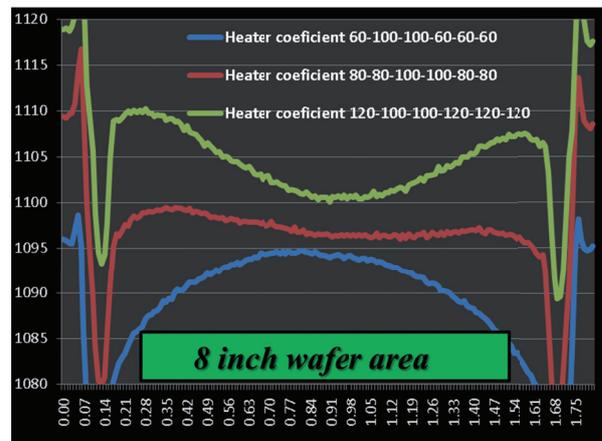


Fig.2 Thermal uniformity within a wafer plate(Law data)

## 3. 実験方法

当社のGaN MOCVD装置は、気相反応を精密に制御できることが特長である。そこで大気圧成長を利用可能である<sup>6-8)</sup>。気相反応を制御できることを示すために、減圧成長においても $1 \mu\text{m/hr}$ 以上の成長速度で成長することの困難なAlN、50%以上のAl組成のAlGaInを $2 \mu\text{m/hr}$ の高成膜速度で成長を行うこととした。

キャリアガスとして水素( $\text{H}_2$ )または窒素( $\text{N}_2$ )、V族原料ガスとしてアンモニア( $\text{NH}_3$ )をそれぞれ精製器を通して用いた。またIII族原料としてトリメチルガリウム(TMGa)、トリメチルアルミニウム(TMA)を成長基板には6インチサファイアc面(厚さ;1.4mm)または8インチシリコン(111面)(厚さ;1mm)をそれぞれ用いた。流量条件やV/III比の条件については、UR25K(6インチ×7枚)の最適条件を当社基準によ

る係数倍した条件を初期条件として採用した。

成長したサンプルの評価手法としては、成膜速度及び膜厚分布の評価には PL マッパー或いは FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)を用いた。結晶性や Al の組成分布の評価には X 線回折装置をキャリア濃度や移動度などの電気的特性の評価には、5mm 角サイズにカットしたサンプルにインジウムを電極材としてホール測定により評価を行った。また表面状態の観察には、ノマルスキー顕微鏡或いは AFM (Atomic Force Microscope) を用いた。

成長によって汚れた石英部品は、UR26K 用に新開発したドライ洗浄装置 (DEX-V8) により定期的に洗浄した。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 シリコン基板上 AIN の成長

8 インチシリコン基板に AIN を成長するための最適な流量条件について決めるため、ガス流れ方向の成膜速度について調べた。自転をさせないために 6 枚の基板載置のコマの 1 枚を自転ギアの無いものに交換している。上流から下流に向かって成長速度が直線的に減衰する傾向が最も理想的な条件であり、自転した場合に、膜厚均一性が最も良くなる。Fig.3 には、3 層の流量バランスは同じ (1:1:1) で、総流量のみを変えたときの結果を示す。総流量；標準条件では、上流側で原料が消費され下流まで届いていない。キャリアガスの流速が遅すぎることによる気相反応が主原因である。一方で総流量；標準条件×標倍では、基板中心部で成長速度が最も高くなっており、この条件では、自転しても面内膜厚分布は均一にはならない。上流から下流へ向かって成長速度の減衰が最も直線的な傾向を有していることから標準条件×準条件倍を最適な総流量として選定した。

気相反応の影響がほとんど無いことが分かっている

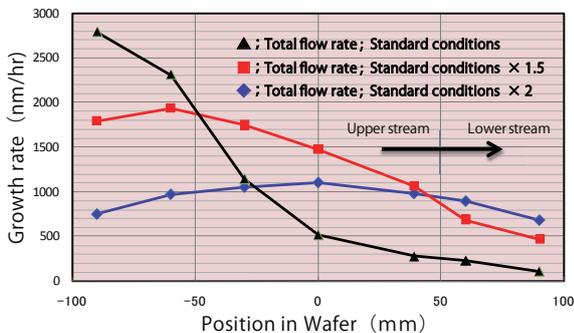


Fig.3 AIN thickness distribution in dependent on total carrier gas flow rate (With only revolution)

流れや温度の条件の範囲では市販のシミュレーションソフトを使用し、実際のリアクタ形状や成長温度、圧力、流量などの諸条件をインプットすることでシミュレーション解析による流量条件依存性の調査が可能である。

Fig.4 にシミュレーション解析によって得られたガス流れ方向における AIN の成膜速度の総流量依存性の結果を示す。比較のため Fig.3 の結果を一緒にプロットした。シミュレーション解析結果はエピ成長結果とほぼ一致しており、エピプロセスの流量条件を検討するうえでシミュレーション解析による最適化は部分的ではあるが可能である。

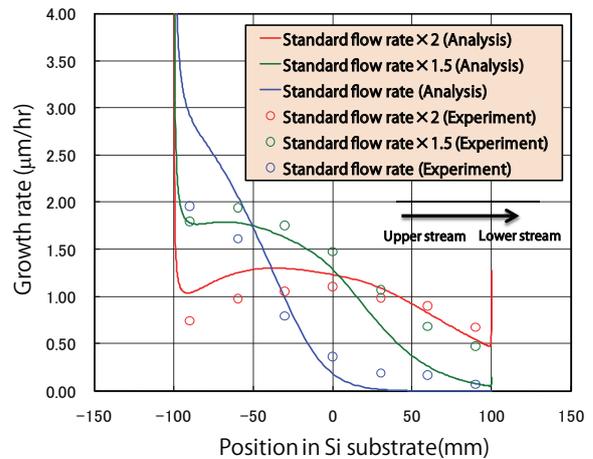


Fig.4 AIN thickness distribution in dependent on total carrier gas flow rate by simulation

次に総流量は一定で 3 層流 (V-III-Top) の流量バランスを変えた時の膜厚面内分布を Fig.5 に示す。流量バランスを V-III-Top=1:1:1 から V-III-Top=1:1:3 に変えたところ膜厚面内分布の傾向が逆転しており、この両者の流量条件の間に最適な流量条件があることを示唆している。実際に V-III-Top=1:1:2 の流量バランスで、膜厚面内均一性は ±1.8%、成膜速度も最も高くなることが分かった。

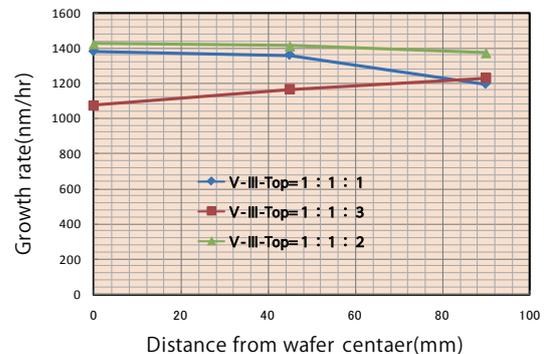


Fig.5 AIN thickness distribution in dependent on carrier gas flow balance

Fig.6は8インチシリコン基板の上にAINを成膜した場合の膜厚均一性を示した。UR25Kにおいてシリコン基板の上にAINを成膜する場合の最適条件のスケールリング条件について更に流量バランスを最適化することで±1.8%とフリンジの無い均一な膜厚均一性を得ることができた。

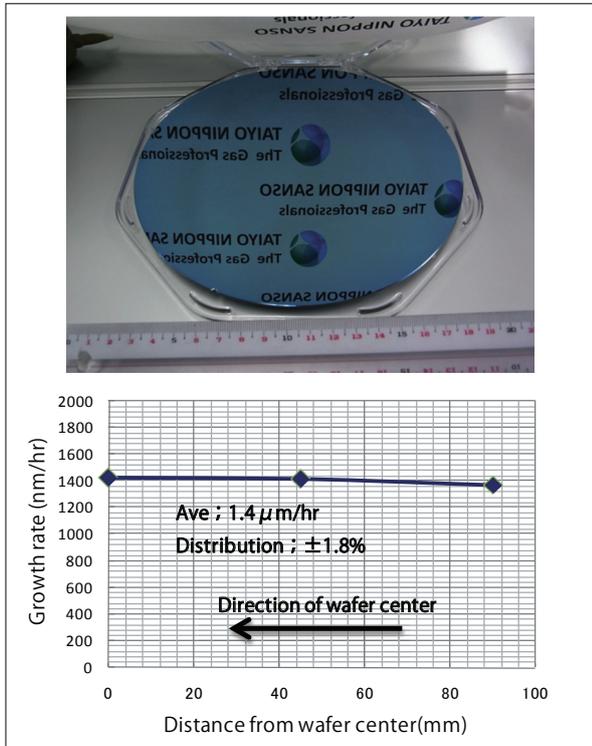


Fig.6 AIN thickness uniformity on 8inch silicon substrate

Fig.7にはTMAの供給量とAINの成長速度の関係をUR25K(6インチ×7枚)の結果と併せて示す。約2μm/hrまで飽和することなくほぼ直線的な関係を維持しており、高い原料濃度のAIN成長においても気相反応が制御されている装置であることを示唆している。

また原料供給量と成膜速度から算出した原料利用効率は約31%であり十分に高い値である。

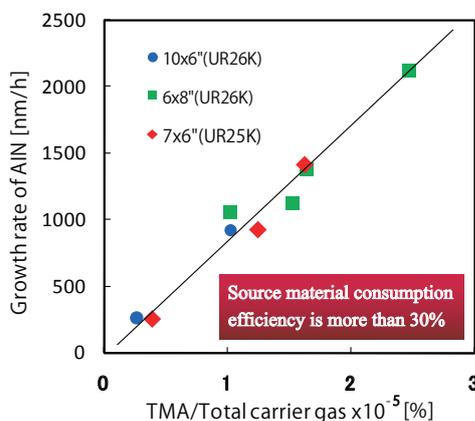


Fig.7 Relationship between TMA flow and AIN growth rate

#### 4.2 シリコン基板上 AlGaIn の成長

Si 基板上の GaN 系電子デバイス構造においては、AlGaIn 層の占める割合が高く、特に下地 AlGaIn 層の成長速度の高速化によりスループットの大幅な改善が期待できる。

今回の AlGaIn 成長では、シリコン基板上に LT-AIN を介して HT-AIN を約 30nm 成長したサンプルをテンプレート基板として使用した。流量条件は、AIN の成長で最適化した V - III -Top=1 : 1 : 2 の流量条件を採用した。

Fig.9には、TMA の気相比 TMA/(TMG+TMA) ; 0.3, 0.5, 0.7 の3種類において成長したときの AlGaIn の Al 固相比を示している。いずれの Al 組成領域においても 1μm/hr 以上の成膜速度でほぼ狙い通りの Al 組成を有する AlGaIn が得られており、UR25K (6インチ×7枚)の結果と比較しても遜色ないレベルである。Fig.9 に示した各 Al 組成の AlGaIn における Al の組成面内分布についても非常に良好な均一性が得られており、AIN 成長と同様に高いレベルで気相反応が制御されていることを示す結果と云える。

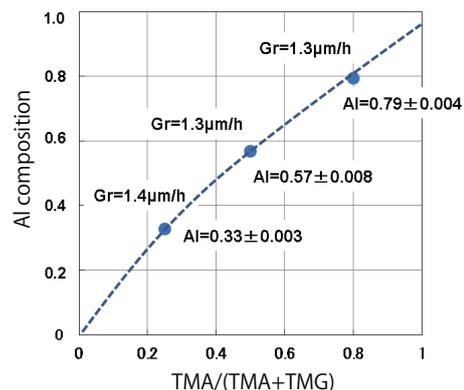


Fig.8 Relationship between TMA supply ratio and Al composition of AlGaIn

#### 4.3 HEMT 構造の成長

今回成長した HEMT(High Electron Mobility Transistor) 構造を Fig.9 に示す。いわゆる AlGaIn と GaN のヘテロ接合を用いた一般的な HEMT 構造である。AlGaIn/GaN ヘテロ界面には、窒化物半導体材料の特徴である分極効果により高濃度の 2次元電子 (2-DEG) が発生する。窒化物半導体特有の高い絶縁破壊電界とヘテロ界面に発生する高濃度キャリアにより高出力動作が可能になるといえるものである<sup>9)</sup>。

成膜構造については、今回 8インチシリコン (111) 基板上への成長という観点から基板と膜の格子不整や熱膨張係数差に伴うクラックや基板の反りの低減を目的として AIN/AlGaIn 80周期超格子構造を挿入した。

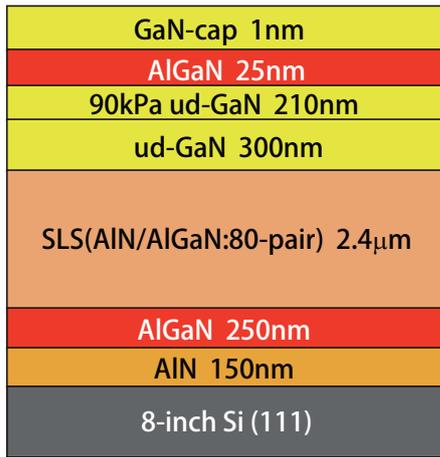


Fig.9 HEMT structure

この効果によりクラックフリーの平坦な膜を得ることができる。

またヘテロ界面で発生する2次元電子の移動度を高くする必要性から AlGaIn 層近傍のバリア層の高品質化が必要である。さらには、Fig.10に示すように GaN 膜中へのカーボンの取り込み濃度は成長圧力で制御することができる。2次元電子のチャンネル近傍では低カーボンの高純度の GaN 層が要求されるので、ヘテロ界面の ud-GaN 層については90kPaの圧力下で成長を行った。UR26K では気相反応が良く制御されているので90kPaの成長圧力においても成長速度を落とす必要がない。成長後のサンプルについてホール測定による電気特性の評価を行った。その結果、シートキャリア濃度  $1.15 \times 10^{13}(\text{cm}^{-2})$ 、移動度；  $1660(\text{cm}^2/\text{Vs})$  と UR25K (6インチ×7枚) の実績を上回る好結果 (Fig.11) が得られた。

またデバイス構造の成長に伴う基板の反りについては、AlN/AlGaIn 超格子緩和層の周期数すなわち厚みを調整することにより制御することが可能であり、

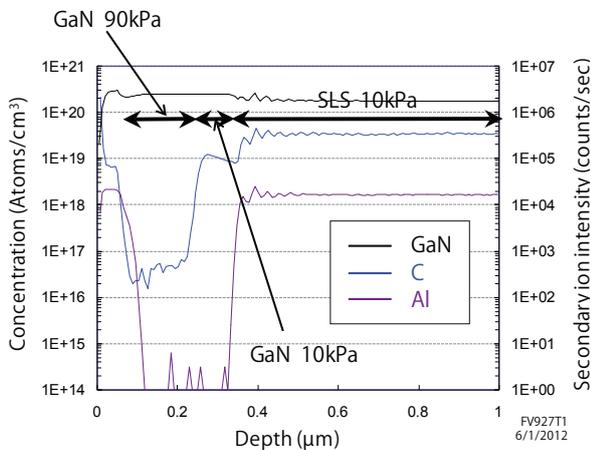


Fig.10 SIMS depth profile of HEMT

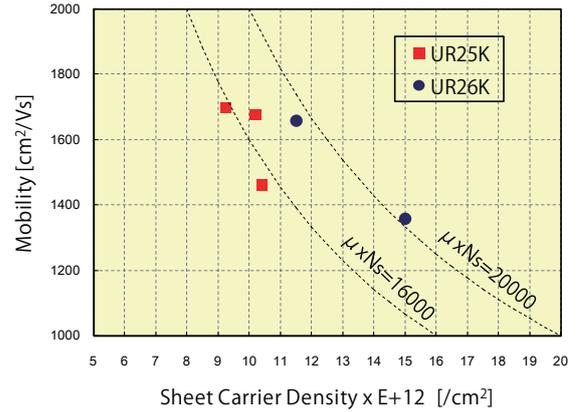


Fig.11 Sheet carrier density vs Mobility

今回8インチシリコン基板上に HEMT 構造を成膜した状態で、室温における反りを  $40\mu\text{m}$  (凹型) 程度まで抑えることができた。

### 5. まとめ

UR26K (8インチ×6枚) のエピプロセスの開発を行った。既設の UR25K (6インチ×7枚) のプロセス条件をベース条件として UR26K に適用し、最適化を行うことで、膜厚均一性、組成均一性、更には HEMT の電気特性においてほぼ同等の結果が得られた。

基板の大口径化に伴い装置をスケールアップした場合でもプロセス条件のスケール倍則が有効であることが実証され、GaIn 系電子デバイスの量産装置として生産性、均一性とも高い性能を有した装置であると云える。

### 【参考文献】

- 1) 吉田貞史「ワイドギャップ半導体；ハードエレクトロニクスと青色発光を目指して」電子情報通信学会誌 79,1219-1228(1996)
- 2) U.K.Mishra, P.Parikh and Y.F.Wu, 「AlGaIn/GaN HEMTs An overview of device operation and application」IEEE 90,1022-1031(2002)
- 3) L.F.Eastman and U.K.Mishra 「The toughest transistor yet」IEEE Spectr 39,28-33(2002)
- 4) Yole development 「GaIn technologies for power electronics applications ;Industry and market status and forecasts」p9(2010)
- 5) 生方映徳、矢野良樹、島村隼人、山口晃、内山康右、田渕俊也、大陽日酸技報 No30, 23-28(2011)
- 6) 阿久津仲男、山口晃、畠山文明、植松邦全、松本功、日本酸素技報 No21, 8-14(2002)
- 7) Tokunaga,H, Ubukata,A, Yano,Y, Yamaguchi,A, Akutsu,N, Yamasaki,T, Matsumoto,K, J.Crystal.Growth, 272,348-352(2004)
- 8) 徳永裕樹、福田靖、生方映徳、阿久津仲男、稲石美明、小関修一、山口晃、植松邦全、大陽日酸技報 No25, 1-6(2006)
- 9) O.Ambacher et al, J.Appl.Phys.87,334(2000)