

Si 基板上パワーデバイス向け MOCVD 装置の開発

Development of production-scale MOCVD system
for GaN power devices on Si substrates

生方映徳*	矢野良樹*	島村隼斗***	山口 晃**
UBUKATA Akinori	YANO Yoshiki	SHIMAMURA Hayato	YAMAGUCHI Akira
内山康右***	田淵俊也*		
UCHIYAMA Kosuke	TABUCHI Toshiya		

大口径 Si 基板上に成長した GaN を用いたパワーデバイスを使用することにより、従来の Si 系パワーデバイスの限界を超えた省エネ化の実現に期待が高まっている。こうした需要に対応する為、6 インチウェハを 7 枚同時に処理することが可能なパワーデバイス向け MOCVD 装置 (UR25K) の開発を行った。スループットを高めるためには AlGaIn 層成長速度の高いことが必要である。一方で原料の TMA と NH₃ の過激な反応により粒子成長しやすいので高速成長が困難である問題がある。UR25K では気相反応が抑制されていることから全 Al 組成領域において 1 μm/h 以上の成長速度が得られた。成膜した高電子移動度トランジスタ (HEMT 構造) は超格子構造のバッファ層構造により、クラックフリーのウェハが最大膜厚 5 μm まで成長できている。シートキャリア密度とホール移動度の値はそれぞれ 1.1x10¹³cm⁻² と 1400cm²/Vs であった。Si 基板は比較的柔らかい基板で歪応力により容易に歪むため、成長中の挙動を観察するために反りモニタを取り付けて最適化に利用した。最大 6 μm 厚のサンプルでもクラックフリーのものが成長できている。エピプロセス開発の上の課題について述べるとともに、留まることのない装置大型化のロードマップについて解説する。

Gallium nitride (GaN) based semiconductors are highly expected to realize efficient energy-conserving devices that overcome the limitations of today's Si-based power devices. To end this demand, a MOCVD system "UR25K" has been developed for power devices. This system is capable of growing on 7 by 6 inch in the same growth run. It is necessary to grow AlGaIn at a higher growth rate to improve throughput. However, it is difficult to achieve a high growth rate for AlGaIn because it forms particulates easily in vapor phase due to parasitic vapor phase reaction between TMA and NH₃. As a result of good control of vapor phase reaction in UR25K, We obtained a large growth rate of 1 μm/h in whole Al composition range in AlGaIn ternary material because parasitic vapor reaction is well controlled for UR25K system. A crack-free high-speed-electron mobility transistor (HEMT structure) with a maximum thickness of 5 μm was obtained by super-lattice structure buffer technique. The sheet carrier density and Hall mobility of the HEMT were 1.1x10¹³cm⁻² and 1,400cm²/Vs, respectively. As a silicon substrate is relatively soft and easily bent by strain effect, a curvature monitor was installed to observe the behavior of wafers during epitaxial growth. In this report, some problem issues on development of an epitaxial process and a roadmap of continuing reactor development are described.

* 電子機材事業本部 事業戦略推進部 先端技術開発部

** 電子機材事業本部 化合物事業部 装置技術部

*** 大陽日酸イー・エム・シー株式会社

1. はじめに

地球環境保護の観点から省エネルギー技術が注目を浴びている。その実現には、電力系統、家電機器に至る幅広い分野での電力変換損失の低減が効果的である。そのための手段としてインバータ化がある。インバータ回路は直流電圧を高速で切り換える半導体スイッチング素子やダイオード等のパワー半導体で構成されており、産業用機器のモータ駆動やハイブリッド自動車の駆動モータ制御などに用いられている。また、こうしたデバイスは照明、エアコンなどの家電製品に広く使われるようになってきている。インバータの電力損失には、スイッチング素子自身の導通時のオン抵抗による損失、ON/OFF 切り替え時に生じるスイッチング損失がある。損失低減のためには、オン抵抗の低減とスイッチングの高速化が必要である。例えば、IGBT ではオン抵抗は低減されるもののバイポーラ動作のため、スイッチング速度が遅くスイッチング損失が大きい。電力有効利用のため、低スイッチング損失と高速スイッチングを両立したパワーデバイスの実現が望まれている。しかしながら、Si 系デバイスでは Si 材料の物性限界のため、これらの特性の両立が限界に近づいてきている¹⁾。

一方、SiC や GaN のようなワイドバンドギャップ半導体は破壊電界が大きいので薄い結晶でも大きな電圧に耐えられる。そこで耐圧部分の直列抵抗が小さくなる。さらに同じ理由で耐圧の大きなショットキーバリアダイオード (SBD) を作れる。スイッチング損失の7割は P-N 接合ダイオードの逆方向電流によるものであるが、SBD をもちいることで抑制できる効果大きい。したがってワイドバンドギャップ半導体を用いた SBD とスイッチの組み合わせが重要である。Fig.1 にパワーデバイスとしての各材料特性の比較を示す。

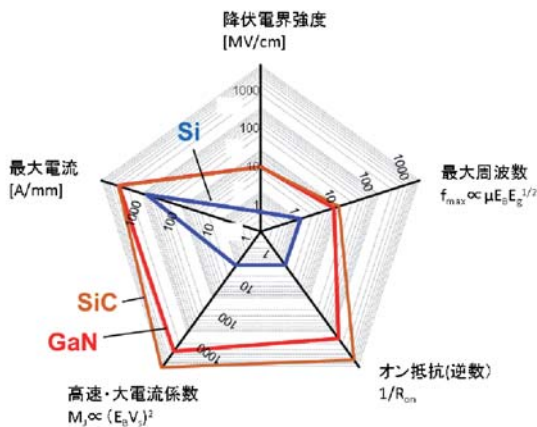


Fig. 1 Fundamental properties for electron devices

GaN 系の電界効果トランジスタ (FET) は、高出力動作、高周波動作及び高温動作が可能であり、Si 系デバイスに比べて優れた性能指数を持つ^{2,3)}。GaN と SiC は共に絶縁破壊電圧が Si に比べて1桁以上高く、理論上3桁以上のオン抵抗の低減が期待できる。この Si 限界を超えた低オン抵抗特性によるパワーデバイスの実現が期待されている。GaN 系半導体の成膜のために、GaN 基板の入手が困難のためサファイア基板や SiC 基板の上に GaN を成膜する所謂ヘテロエピタキシャル成長技術が採用されている。GaN は安価で大口径な Si 基板上に成長することができるのが特徴である。低コストなパワーデバイスの実現が期待できる。しかしながら、Si 基板にはサファイア基板や SiC 基板同様、GaN との大きい格子定数差・熱膨張係数差があり課題となっている。一方、SiC は4インチと小さく高価であるが、単結晶ウェハが市販されており、単結晶のホモエピタキシャル SiC 結晶により1000V 以上の高耐圧大電力用パワーデバイスとして期待されている。

2. GaN 系パワーデバイスへの期待

AlGaN/GaN 系デバイスは高い電子飽和速度と高い2次元電子ガス濃度、および GaN の物性そのもの起因する高い絶縁破壊電界によって電極間距離を小さくすることができるので、低オン抵抗・高耐圧の半導体デバイスを実現できる。

しかしながら、AlGaN/GaN HEMT 構造を大電流で扱うパワーデバイスに応用する場合、従来一般的な横型デバイス構造では、配線に起因する寄生抵抗を十分に低減するにはチップ面積に占める配線面積が増大しチップサイズの縮小が困難である。これまで GaN 系半導体を成膜するためには、サファイア基板あるいは SiC 基板が用いられてきた。サファイア基板は熱伝導率が低く放熱特性が危惧される。口径も最大6インチ(一部小ロット販売を除く)までしか実現されていないので将来の大口径化に適用できない。SiC 基板は高価かつウェハサイズが4インチと小さく、デバイスの低コスト化が困難という課題を有していた。一方、近年、Si 基板上に良質な GaN 結晶を成長させる技術が急激に進歩してきている⁴⁾。Si 基板は安価(サファイア基板の1/10程度、SiC 基板の1/100程度)であり、また高抵抗は無論、電気的・熱的な伝導性に優れており縦型デバイスの実現も可能になっている。さらには Si 基板上で HEMT 構造と SBD とのモノリシックスイッチングモジュール等の集積技術も期待されている⁵⁾。

こうした GaN 系パワーデバイスの需要に対応した MOCVD 装置開発を進めている。プロセスにおいては、大口径ウェハの反り制御が課題となっている。歪応力によるウェハの反りの影響は大口径になるほど深刻になり、反りの制御のためには超格子構造 (SLS 構造) の最適化が重要である。単層膜のプロセス結果を調査し、SLS 構造を含む HEMT 構造の面内分布と電気特性を報告する。また、UR25K を用いて膜厚成膜中の反りを観察するモニタを成膜装置に取り付けてウェハの挙動を観察した。

3. MOCVD 装置 (UR25K) について

開発した UR25K について述べる。本装置は 6 インチ基板を 7 枚同時処理することが可能な多数枚炉となっている (Fig.2 参照)。



Fig. 2 Susceptor of 6" x 7pcs UR25K MOCVD system

ウェハ下部にはサセプタ公転にリンクしたギアが設けられることにより自転する、所謂「自公転」運動によって成膜均一性を向上させる。ギアで機械的に自転させる方式は当社独自と云っても良いであろう。キャリアガスには水素及び窒素を用いている。V 族原料ガスにはアンモニア (NH₃)、III 族原料にはトリメチルガリウム (TMG)、トリメチルアルミニウム (TMA) を用いた。III 族原料とアンモニアは反応性が激しく、気相反応の抑制には炉の設計が重要である。そこで原料ガスの導入ノズルは“三層横型フロー構造”とし V 族ガスと III 族ガスを分割した状態で供給する方式としている。当社製中・小型炉で採用されている原料供給方法を踏襲している⁶⁻⁹⁾。また、リアクタ内は小型炉 (SR4000) をベースに設計し、小型炉のレシピをそのまま展開しやすいようにした。通常、パワーデバイスは減圧にて成長されるが、炭素の混入を少なくする目的で HEMT 構造のバッファ層は大気圧成長が望ましい。当該装置は気相反応を十分に抑制できているので、小型炉の特徴であった「大気圧成長」を可能にすることができた。

一度成膜に使用し汚れた炉内パーツはロボットによ

り自動搬出できる機構を設けた。このコンセプトはパーツが大型化してもオペレータに負担をかけないように配慮している。特にサセプタ自体を空気に曝すことなく汚れた部品のみを取り出すよう工夫されていることが特徴である。当該装置の必須アイテムとして、汚れた部品を洗浄するためのドライ洗浄装置も同時並行して開発した。ウェット洗浄など従来技術に比べると大きいパーツを安全・簡便に作業できる点で優れている。

4. 結晶成長及びプロセス技術

4.1 高速成長 AlGaIn の結果

MOCVD 法により Si 基板上に直接 GaN 成長を行うと、Si と Ga が反応して融解して Si 基板側に大きなボイド (空隙) が発生する。Si 基板表面を AlN 中間層で完全に覆うことによりこの融解反応が抑制され GaN 成長表面の平坦性が向上することが知られている¹⁰⁾。そこで AlN 中間層の結晶性が重要である。シリコン基板は 6 インチ (111) 面基板を使用した。リアクタに搬送した後に表面温度 1050℃、水素雰囲気中で熱クリーニングを施した。引き続き成長圧力 10kPa、1050℃にて AlN バッファ層を 100nm 成長した。AlN 単膜のロッキングカーブ半値幅は約 900arcsec であった。

Fig.3 に AlGaIn 層の Al 組成と TMA 供給分圧の関係を示す。

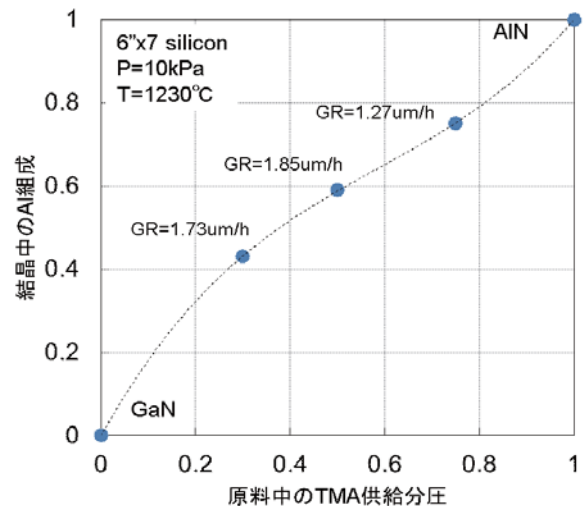


Fig. 3 Al composition in AlGaIn vs. TMA supply ratio

全ての Al 組成領域においてほぼニアに Al 組成が制御できていることが分かった。各プロットの数値は成長速度を示しているが、いずれの値も 1μm/h 以上と高い値が得られている。報告例のある量産装置の成膜速度はおおよそ 0.5μm/h 程度である¹¹⁾。最も気相反

応の激しい AlN でも 1.4 $\mu\text{m}/\text{h}$ が得られている。高い原料濃度にも関わらず Al 組成がうまく制御できていることは、気相反応が制御されていることを示唆しており、UR25K の特徴と云える。いずれのプロットも成長速度はまだ飽和に至っていないことから、原料の蒸気圧を高くすればさらに成長速度を上げることも可能であろう。

4.2 HEMT 構造の成長

HEMT 構造はシリコン (111) 面上に AlN(100nm) と AlGaIn(40nm) を成長しさらに SLS 構造を成長した。後述するが SLS 構造でウェハの反りを制御しクラックを抑制する。SLS 構造上に GaN を約 1 μm 成膜し、最後に電子供給層として AlGaIn 層を 40nm 成長し HEMT 構造とした。構造全体の総膜厚は約 5 μm である。Fig.4 にウェハ外観を示す。

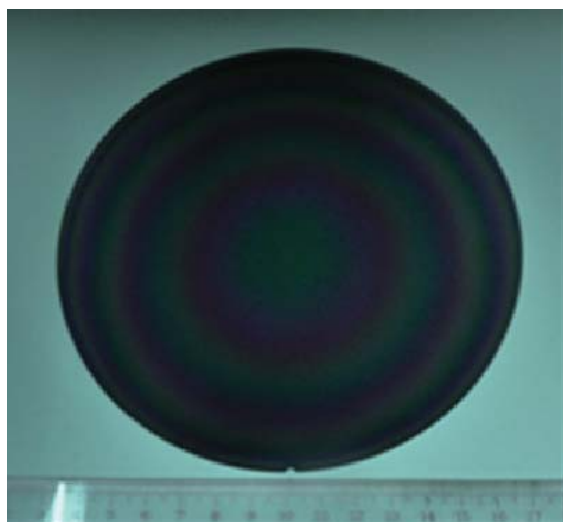


Fig. 4 6 inch wafer of HEMT structure

ウェハ全面鏡面でクラックフリーのウェハが得られている。GaN のロックンクカーブ半値幅は、GaN(002) 方向 =580arcsec, GaN(102) 方向 =1400arcsec となった。Si 基板上 GaN としては平均的な結果と思われる。バッファ層の歪制御をさらに進めることよりさらに結晶性を改善することが可能である。

Fig.5 に HEMT 構造の膜厚分布を光学的に測定した結果を示す。図から明らかなようにウェハ面内の膜厚は中心が厚く外周が薄くなる傾向がある。成長中に凸形状に反ってウェハ中心がサセプタから離れていて、基板温度が下がるためである。ガス冷却効果の最適化等により面内の温度分布を改善すれば膜厚分布改善が可能である。ウェハ間分布は $\pm 0.7\%$ であった。基板が自公転しているの、ウェハの反りを制御することにより、ウェハ面内膜厚分布はさらに改善する。

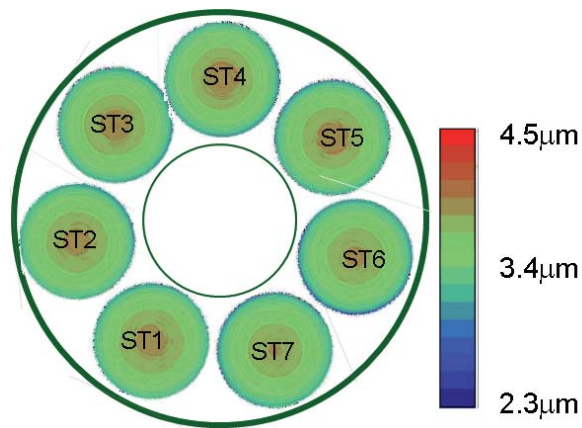


Fig. 5 Thickness mapping data of HEMT structure

HEMT 構造ウェハを 5mm 角のサイズに切り出して電極を取り付け簡易的にホール効果測定を行った。結果を Table 1 に示す。シートキャリア密度は $1.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, ホール移動度 = $1400 \text{cm}^2/\text{Vs}$ となった。試料の断面 TEM 像を Fig.6 に示す。SLS 構造は 130 周期である。観察像から良好な界面が成長されて周期膜厚は 30nm であることが確認された。

Table 1 Result of Hall effect measurement

シート抵抗 [ohm/sq.]	シートキャリア 密度 [cm^{-2}]	ホール移動度 [cm^2/Vs]
420	1.1×10^{13}	1,400

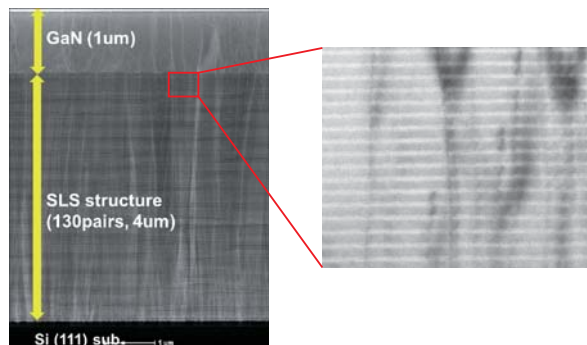


Fig. 6 Cross-sectional TEM view of HEMT structure

Fig.7 に HEMT 構造の深さ方向プロファイルを示す。[Si] 濃度は 15 乗前半と低い値を示した。[C] 濃度の制御は成長圧力が効果的である¹²⁾。GaN 成長中の成長圧力を 13kPa から大気圧 (ATM と表示) まで変化した結果、[C] 濃度は $[C]=3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ から $[C]=2.8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ に低減することを確認した。デバイス中の C 不純物は Si 基板に近い側ではリーク電流を防止する目的で高濃度にドーピングして高抵抗化し、HEMT 構造の近くでは炭素が電子捕獲中心になるので少なくする必要がある^{13,14)}。

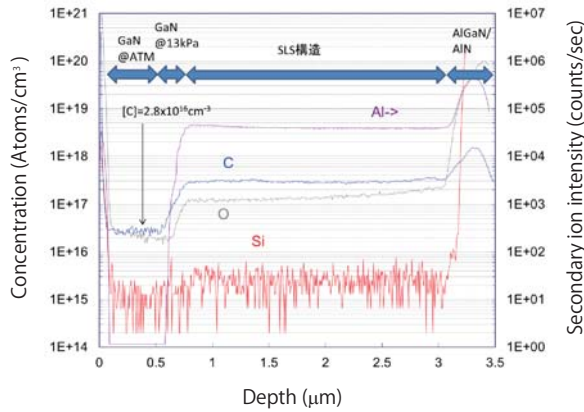


Fig. 7 SIMS depth profile

5. ウェハ反り制御

シリコン基板の上に GaN を直接成膜すると大きい熱膨張係数差の関係から引張歪が誘引されてウェハは大きく凹形状に反ることが知られている。成長膜厚が 0.2 μm を超えた辺りで全面にひび割れ(クラック)が発生してしまう。そこでクラックを抑制し、さらに反りを低減する技術は大口径基板の後工程を進める上で重要課題となっている。SLS 構造のようなバッファ層を用いると、反り量が抑制されてクラック発生を防ぐことができる。AlN と (Al) GaN の超格子構造を用いた。室温での熱膨張係数は GaN>AlN であるが、成長温度近傍の 1100 $^{\circ}\text{C}$ では逆転する。中間層に超格子構造を用いることによって GaN には圧縮歪が挿入されるので全体の歪が補償されて反りが緩和する。理論上は AlN, GaN とともに Si に対して引張歪であるに関わらず、超格子構造により圧縮応力が働く原理は十分な理解が得られているわけではないが、可能性について筆者らは次のように推測している。

- (1) AlN が薄いと歪制御の効果が弱くてクラックが入る。しかし厚すぎても三次元成長の影響によりひび割れてしまう。コヒーレント成長する臨界膜厚が存在し、臨界膜厚近傍でのみクラックフリーが実現して反りが制御され、且つひび割れないウェハが実現する。
- (2) AlN は三次元成長しやすい結晶であるので、三次元成長核等による成長の異常個所により部分的に応力緩和(結晶転位)が生じる。AlN 結晶は適度な硬さがあるため、応力部分緩和は伝搬しにくく、それぞれの界面に留まるので数10層繰り返す間に Si 基板から受けている応力に対向するまで増大すると考えられる。

成膜中のウェハの挙動を観察するために反りモニタを導入した。このモニタは光源に半導体レーザーを用い

ており、ウェハからの反射光を二次元フォトディテクタで位置検出することによって、ウェハの曲率半径を計算する。ウェハは自公転運動しているのでレーザーの軌跡は複雑である。曲率の計算はソフトウェアによって自動的に算出できるようにした。Fig.8 にモニタを用いた測定例を示す。

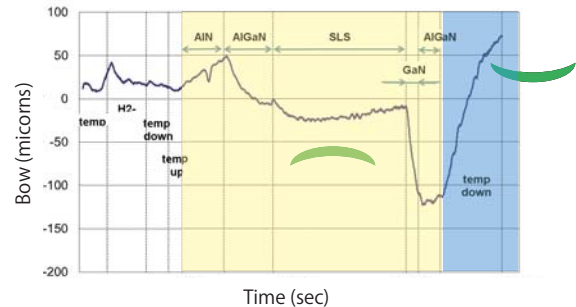


Fig. 8 Example data of curvature monitor

図中原点よりプラス/マイナス方向はそれぞれ凹形状/凸形状に反っていることを示している。縦軸の値は、反ったウェハの最高値と最低値の差(すなわち反り量)を示し横軸は成膜経過時間を示す。ウェハを昇温し AlN を成長した時点ではさほど反りは発生していない。これは AlN が三次元成長しやすく、応力を逃がしながら成長しているためであると推測される。SLS 構造が成長されるとウェハは圧縮応力を受けて上凸形状に反っている様子が観察された。しかし、SLS 構造成長途中から次第に反りはむしろプラス方向になった。これは前述 (1) あるいは (2) の作用による物理現象と考えられる。さらに GaN を成長すると極端に下凸形状に反った。これは SLS の平均的格子定数に比べて GaN の格子定数が大きいためである。Fig.8 から SLS 上の GaN はほとんど緩和することなくコヒーレントに成長されていることがわかる。以上、図中の黄色領域は格子歪が支配的な領域である。AlGaN 層を成長した後に降温過程(図中の青色領域)では、反りが極端にプラス方向に変化しており、膜と Si 基板との熱膨張係数差による影響が支配的であることを示唆している。

GaN/SLS 構造では GaN と SLS の線膨張係数差から圧縮応力を生むのでエピタキシャル膜全体の熱膨張と Si 基板の熱膨張の違いによる引っ張り応力の吸収の働きをしていると思われる。いずれにせよ個々の層の残留応力と全体の反りとの関係は未解明の部分が多いので今後の研究が必要である

6. 大口径化する MOCVD 装置

パワーデバイスの6インチ用装置として開発を進め

てきたが、GaN系デバイスはSi系デバイスに比べてまだ数倍高価であり、コスト低減をさらに加速すべきであるし、大口径化の歩みは留まることのないであろう。8インチユーザに対応するため、8インチ6枚仕様の装置(UR26K)を今期つくば研究所に設置した。装置コンセプトはUR25Kを踏襲しているが、筐体内部構成を見直しフットプリントをUR25Kと同等サイズにコンパクト化することができた。また自公転の駆動機構やサセプタ大型化に伴うユニークな搬送システムが追加されている。Fig.9にウェハの年間生産量(面積)を示す。8インチ化することにより生産量は約2倍(対6インチ比)改善する。

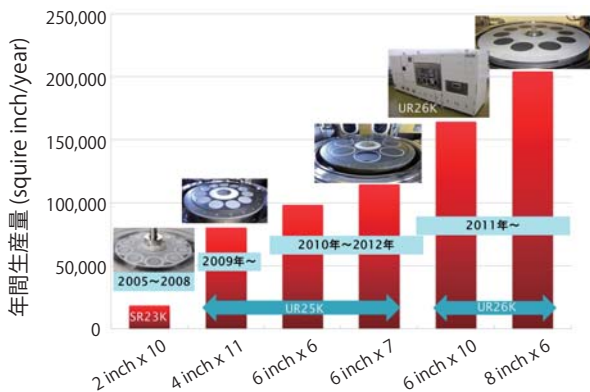


Fig. 9 Amount of production area in one year

7. おわりに

パワーデバイス用MOCVD装置のプロセス開発の状況について報告した。SLS構造を最適化した結果、6インチ径で最大5 μ m厚HEMT構造がクラックフリーで成長できている。プロセス条件の最適化の過渡段階であるが、シートキャリア密度は $1.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 、ホール移動度は $1400 \text{cm}^2/\text{Vs}$ であった。今後さらに反り制御のためにエビ技術を進め、他のSi基板上アプリケーションに対応できるようにする。

謝辞

本研究の一部は独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のナノテクノロジープログラム・革新的部材産業創出プログラム/「ナノテク・先端部材実用化研究開発」/「原子レベル薄膜成長によるシリコン基板上窒化物結晶成長技術と素子化技術の実用化研究」の補助によるものである。また、Si基板上GaNプロセス技術の御指導頂いた名古屋工業大学 極微デバイス機能システム研究センター江川孝志教授に感謝します。

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 (1996) p.1219-1228.
- 2) 吉田貞史 「ワイドギャップ半導体による高パワーデバイス特性の向上」 電子技術総合研究所彙報 第62巻,第10,11号
- 3) Okumura, H. "Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-Power Devices" Jpn. J. Appl. Phys. (2006) Vol.45, No.10A, 7565-7586.
- 4) 大塚康二 "Si基板上への窒化物半導体のエピタキシャル成長技術とインパクト" 応用物理 (2009) 第76巻, 第5号, p.489-494.
- 5) Uemoto, Y.; Morita, T.; Ikoshi, A.; Umeda, H.; Matsuo, H.; Shimizu, J.; Hikata, M.; Yanagihara, M.; Ueda, T.; Tanaka, T. and Ueda, D. "GaN Monolithic Inverter IC Using Normally-off Gate Injection Transistors with Planar Isolation on Si Substrate" IEDM '09 proceedings, (2009), p.165.
- 6) Selvaraj, J.; Selvaraj, S.L.; Miyoshi, M.; Kuraoka, Y.; Tanaka, M. and Egawa, T. "Device Characteristics of Metalorganic Chemical Vapor Deposition-Grown InAlN/GaN High-Electron-Mobility Transistors on AlN/Sapphire Template" Jpn. J. Appl. Phys. (2009) Vol.48, pp.04C102-1-04C102-4.
- 7) Arulkumaran, S.; Vicknesh, S.; Ing, S.N.; Lawrence S.; Selvaraj, J. and Egawa, T. "Improved Power Device GaN-based LEDs grown on 6-inch diameter Si (111) substrates by MOVPE" Proc. of SPIE (2009) Vol.7231, 723118-3.
- 8) Miyoshi, M.; Sakai, M.; Arulkumaran, S.; Ishikawa, H.; Egawa, T.; Tanaka, M. and Oda, O "Characterization of different-Al-content AlGaIn/GaN heterostructures and high-electron-mobility transistors grown on 100-mm-diameter sapphire substrates by metalorganic vapor phase epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys. (2004) Vol. 43, No. 12, pp.7939-7943.
- 9) Ubukata, A.; Ikenaga, K.; Akutsu, N.; Yamaguchi, A.; Matsumoto, K.; Yamazaki and T.; Egawa, T. "GaN growth on 150mm-diameter Si (111) substrate" J.Cryst. Growth (2007) Vol.298, pp.198-201.
- 10) Dadgar, A.; Blasing, J.; Diez, A.; Alam, A.; Heuken, M. and Krost, A. "Metalorganic Chemical Vapor Phase Epitaxy of Crack-Free GaN on Si (111) Exceeding 1 μ m in Thickness" Jpn. J. Appl. Phys. (2000) Vol.39, pp.1183-1185.
- 11) Zhu, D.; McAleese, C.; McLaughlin, K.K.; Häberlen, M.; Salcianu, C.O.; Thrush, E.J.; Kappers, M.J.; Phillips, W.A.; Lane, P.; Wallis, D.J.; Martin, T.; Astles, M.; Thomas, S.; Pakes, A.; Heuken, M. and Humphreys, C.J. "GaN-based LEDs grown on 6-inch diameter Si (111) substrates by MOVPE" Proc. of SPIE, (2009), Vol.7231 723118-3.
- 12) Koleske, D.D.; Wickenden, A.E.; Henry, R.L.; Twigg, M.E.; "Influence of MOVPE growth conditions on carbon and silicon concentrations in GaN" J. Cryst. Growth (2002) Vol.242, pp.55-69.
- 13) Armstrong, A.; Arehart, A.R.; Moran, B.; DenBaars, S.P.; Mishra, U.K.; Speck, J.S. and Ringel, S.A. "Impact of carbon on trap states in n-type GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition" Appl. Phys. Lett., (2004), Vol.84, No.37, pp.374-376.
- 14) Kato, S.; Satoh, Y.; Sakai, H.; Iwami, M.; Yoshida, S. "C-doped GaN buffer layers with high breakdown voltages for high-power operation AlGaIn/GaN HFETs on 4-in Si substrates by MOCVD" J. Cryst. Growth, (2007), Vol.298, pp.831-834.