

光デバイス開発を加速する オン・シリコン加工基板

デイビッド・ウイリアムズ、アンドルー・クラーク、マイケル・レビー

厚い(3-10 μm)「オン・シリコン」加工基板—希土類酸化物の場合もある—が、現在そして次世代のフォトニックデバイスの大量需要に応えられるように生産されようとしている。

「オン・シリコン」III-V技術により、シリコン製造業になじみのある基板にIII-V材料の特性を注入したすばらしい新世界が可能になるかも知れない。発光はIII-V材料の主要な利点であるが、シリコンよりも高い電子移動度により高速、ハイパワーアプリケーションが実現可能となる。これは、電圧調整器やインバータを必要とするLED照明業界にとっても重要である。

III-V—オン・シリコン技術プラットフォームにとって重要なことは、ウエハが平坦であることだ。窒化ガリウム(GaN)、ガリウム・ヒ素(GaAs)、インジウム・ガリウム・ヒ素(InGaAs)それにゲルマニウム(Ge)などの技術的に重要な材料をシリコン(Si)ウエハ上に置くと、平坦性が大きな課題になる、これは主として熱膨張の問題によるものだ。

エピタキシで高温となる場合、基板とその上の層との間で熱膨張係数が大きく違うことにより冷却するとウエハが大きく反る。反りが大きすぎて、ウエハに物理的亀裂が生ずることもある。ウエハが反ると、ウエハ処理にスキヤナやステッパーなどの標準的なシリコン業界のツールが使えなくなり、既存のシリコンインフラストラクチャを利用するウエハ処理の主要な利点なくなる恐れがでてくる。したがって、反りを和らげる方策が大きな関心事になっている。

トランスルーセント社(Translucent)



図1 透過型電子顕微鏡(TEM)から、ゲルマニウム/スズ(Ge/Sn)境界の不整合転位が分かる。

では、関心のある材料系に応じたオン・シリコン技術に向けて2つの一般的なアプローチを開発した。まず、改良版化学真空蒸着(CVD)装置を用いることでゲルマニウムはシリコンに直接成長できる。これは、シリコン基板ベース多接合型太陽電池アプリケーションやGaAsフォトニック集積アプリケーションにはよく適合している。理由は、貫通電極を維持できるのでデバイスアーキテクチャ再加工が不要となるからだ。第2のアプローチは、単結晶酸化バッファ層の利用。これにより、絶縁システム上にGaNを作製できる。これは、現在上面コンタクトを利用しているLED、電界効果トランジスタ(FET)のいずれかで基板として利用できる。

また、酸化物の誘電特性はパワーFETの電気パフォーマンスを改善することができる。われわれの基板は有機金属化学気相成長法(MOCVD)による成長向けのテンプレートに適してお

り、それに続くGaN成長は発光特性を実証している。酸化物結晶は追加の半導体層エピタキシをサポートしているので、酸化層と追加のシリコンエピタキシをペアにしてSi-GaNバッファ層に分布ブラッグ反射器(DBR)を埋め込むことも可能だ。

InGaAs on Siに近づく Ge-on-Si

トランスルーセント社は、業界で一般的となっているSiGe組成評価スキームを用いずにシリコン基板への直接Geエピタキシを実証した。われわれの技術は、スズ(Sn)を加えて欠陥の広がりを制御し、他のIV族元素と二元、三元合金を作る(GeSn, SiGeSn)。これらの薄膜は、独自の改良型CVD工程を用いてシリコンに直接堆積する。一般的なソース(原料ガス)として、ジゲルマン(Ge_2H_6)、トリシラン、重水素化スズ(SnD_4)を用いている。当初の製品開発では、シリコン上に5 μm 厚Geを堆積することに注力していた。これは、ハイパフォーマンス、高効率多接合太陽電池で使用するバルクGe基板の置き換えだった。これには、0.1-0.5%の範囲でSn(スズ)が必要となる。

最初の静電容量電圧計測では、キャリア濃度 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のp型であることが示されている。粗さ測定では、最終Ge-on-Siテンプレートは、5 μm 平方原子間力顕微鏡(AFM)画像で、実効値(rms)0.65nmであることが示されており、次のInGaAsなどのIII-V材料のMOCVDエピタキシの要件を満足している。透過型電子顕微鏡(TEM)デ

ータでは、結晶品質は良く、不整合転位の大部分はGe/Si接合面にしか見られないことが明らかになっている(図1)。Ge/Si接合面はかなり「クリーン」であり、この点はこの材料の電氣的挙動が良くなるために重要であると考えている。化学エッチングによる欠陥解析からは、欠陥密度が 1×10^6 のオーダーであることが分かっている。X線回折測定では、(004)回折は 0.106° (382 arc-sec)半値全幅(FWHM)、Geの引張歪は0.17%であることが示された。

成長レートが良いとは、その工程が量産に向くことを意味する。Geテンプレートは数 μm 厚まで可能であり、多接合太陽電池、GaAs集積フォトニクス、また可能性としてはレーザーベースなど、他の構造の出発点となる。シリコン基板が選ばれたのは、Geがバルク基板で現在使われているのと同じ結晶配向を持つようにするためである。つまりこれは、 $\langle 111 \rangle$ 方向に 6° ミスカットしたSi $\langle 100 \rangle$ 上に成長させるPVテンプレート向けである。基板にボロン(B)を添加(シート抵抗 $0.01\text{--}0.02 \Omega\text{-cm}$)したのは、100mm径、150mm径ウエハを用いる際に現在の装置の設定で裏面コンタクトを容易にするためだ。

トランスルーセント社の工程を用いて、英国IGE社がInGaAs膜をGeSnに直接成長した。室温フォトルミネセンス(PL)測定結果は、869nmでピークPLを示しており、これは多接合太陽電池エピタキシ構造でGe上に一般的に成長したGaAs ($\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$)のIn濃度1-2%で期待できるものだ。もう1つ重要な点は、GeがIII-V材料に拡散しないことだ。IQEによる二次イオン質量分光(SIMS)プロットの示すところでは、エピタキシャル層からのGeはInGaAsに拡散しない、つまりこの材料はバルクGeと同様に安定的であること

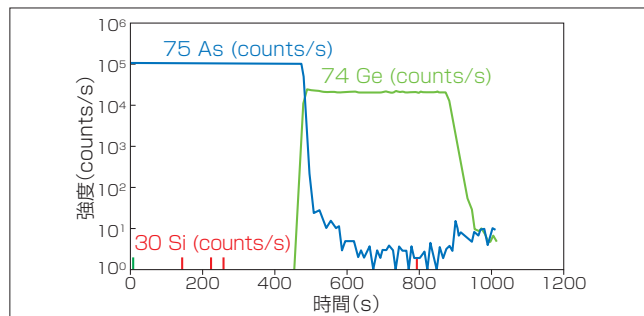


図2 二次イオン質量分光法(SIMS)計測から、トランスルーセント社の工程ではエピタキシャルレーザからのゲルマニウム(Ge)がInGaAs層に拡散しないことが分かる。

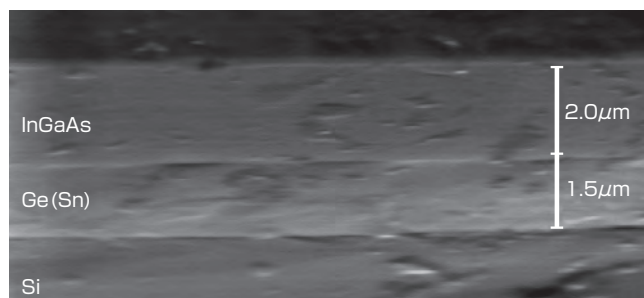


図3 走査型電子顕微鏡(SEM)画像は、Si-Ge-InGaAs層を示している。

を示している(図2、3)。

GeSn層でズズ(Sn)濃度を変えると、Geの感度を赤外(IR)に伸ばすことになり、太陽照射の吸収能力を改善したGeSn太陽電池も可能になる。GeSn合金とすることで1eV動作の三元材料への道が開ける、このレベルの能力は太陽電池の効率を50%+レンジに押し上げるのに必要であると以前から言われてきた。シリコン基板に多接合太陽電池を作製するための基礎を築き、コストを下げ、集光型太陽光(CPV)発電産業で、より大きな基板を使用する可能性が増すという理由で、これはすばらしい技術である。

GaN on Siに近づく SOI

絶縁膜上に形成した単結晶シリコンを基板として半導体(SOI)を作製するアプローチは、オン・シリコンソリューションを実現する汎用的な方法であり、照明やエレクトロニクスアプリケーションに用いられている。二元希土類酸化物のいくつかは格子定数がシリコンの格子定数のほぼ2倍であるのでシリコ

ン上に酸化絶縁膜を成長することは可能である。われわれは、酸化物の組成を変える方法を開発した、例えば酸化ガドリニウム・ネオジウム($(\text{Gd}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{O}_3$)では、格子定数がピュア Nd_2O_3 の 11.08 \AA とピュア Gd_2O_3 の 10.81 \AA との間になるようにxが変わる。格子定数は、 Gd_2O_3 を酸化エルビウム(Er_2O_3)を混ぜ合わせて($\text{Gd}_{(1-x)}\text{Er}_x$) $_2\text{O}_3$ とすることも可能だ。こうすることで、ピュア Er_2O_3 は 10.55 \AA のレンジになる。三元酸化物希土類の組成を注意深くコントロールすることで、シリコンの格子定数と整合するように、非常に正確な格子加工が可能になる。

すでに述べたように、反りを緩和することはテンプレート加工の要である。酸化物の厚さを厚くすることで、凹型湾曲を相殺することができる凸型湾曲のウエハが造れる。凹型湾曲は、通常シリコン上にGaNを成長することで生ずる。さらに、その構成成分(金属と酸素)からの酸素によって組成と化学的性質が最適化されることで、歪エンジニアリングで多機能アプローチが可

能になる。このエピタキシャル・エンジニアリングというコンセプトを拡張して、基板とGaNを核とする結晶上部酸化物面との間にアモルファス中間層を容易に成長できるようになる(図4)。

われわれのバーチャルGaN基板は、希土類酸化物(REO)層と上部に成長したGaNシード層とで構成するように設計された基板だ。この基板はMOCVD条件にも適合しており、それに続く厚いGaN層成長のためのシード層となる。X線解析(XRD)で調べた詳細な線幅と表面粗さから、MOCVD後、結晶品質と表面粗さが改善されていることが分かる。最終的な線幅は、600-800 arc-sec(約1800arc-secから改善)、一方粗さ(rms)も8nmから<1nmへ減少している。

鏡面基板

酸化物中間層を持つオン・シリコン技術は、格子整合や歪エンジニアリングを実現するための多目的ツールである。とは言え、材料系はこの能力の範囲を超えており、DBRをこの誘電体層内に造りリフレクタを作製することができる。われわれは通常、希土類酸化物(REO)とSiで構成される材料ペアを用いて85%+の反射特性(R)を実現する。SiとREO間の高屈折率差のために、これら高いR値はわずか4ペアの層で実現できる。10~20層が珍しくない他の材料系と比べると著しく優れている。

他のエピタキシャルDBR構造と同様に、層の正確なコントロールによりDBRの中心波長とストップバンドの両方(波長全域でR>75%)を設定する。LEDアプリケーションの典型的なミラーは中心波長が450nm、ストップバンド範囲100nm、ピーク反射特性は80%以上。これは「ミラード・シリコン」製品と呼ばれており、LED照明設計に適

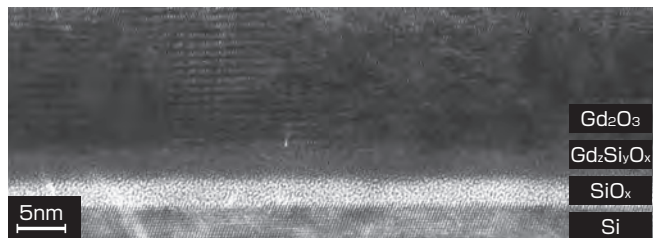


図4 結晶構造に挟まれたアモルファス中間層が柔軟なインターフェイスを形成し、ここでは応力や熱歪が減少してクラッキング(亀裂)が緩和され、大型で熱耐性が高い構造が可能になる。

している。ここでは使える光放射の大部分がウエハ面に対して垂直になっているからだ。

このような材料系では基板に向かって伝搬する光子が今までのように無駄になることがないので、この技術はLEDの光出力を高める。利用した特殊なパッケージング方法の恩恵もあるが、この方法は許容範囲の角度であればLED出力効率を70%は楽に増やす可能性がある。この材料の選択は問題がないわけではない。と言うのは、シリコンはGaN LEDの発する青色光を吸収するからだ。とは言え、層数が少ないことは、85%のR値が容易に達成可能であることを意味する。

さらなるSOIの進化

GaN-on-SiテンプレートでMOCVDエピタキシを用いることにより、REO遮蔽層を持つハイパワーFET構造デザインを実証した。酸化物の高誘電率(high-k)は、同じ降伏電圧を達成するためにGaN層を薄くできることを意味する。このようなデバイスにより、発光と発光素子を駆動するパワーエレクトロニクスの両方を同じ基板上に集積できる。しかも、III-Vと酸化物の最上層をエッチングで除去して、シリコンエレ

クトロニクス回路成長に使用できるようにシリコン基板を残すこともできる。

GaN-on-Si LEDsは、将来的にサファイアの魅力的な代替となり、200mm以上のウエハサイズへの道となる。財務的には、これは理にかなっている。減価償却済みのシリコンファブがGaN-on-Si工場として活気を取り戻すことができるからだ。根本的に、この技術の真の力は、世界中に存在する高度に自動化された150mm、200mm量産シリコンファブでこれらのウエハが加工できるところにある。

シリコン基板をベースにしたIII-Vエレクトロニクスとオプティクスのオン・シリコンの世界がすぐそこまで来ているとわれわれは考えている。トランスルーセント社では、われわれのオン・シリコン技術はエレクトロニクスと集積フォトニクス業界にGaNとGe基板の両方に関心のあるものを提供している。これらの材料は、潜在的な経済性のある量産環境で、SiプラットフォームをIII-V族コンパチブルとするものである。当社では現在、試験生産に入っており、現在そして次世代の集積フォトニックとエレクトロニクスデバイスのニーズに対応できるようにオン・シリコン製造ライン増やそうとしている。

参考文献

(1) R. Rourke et al., IEEE J. Quantum Electron., 47, 2, 213-222 (2011).

著者紹介

デイビッド・ウィリアムズ(David Williams)はトランスルーセント(Translucent)社のフォトニクスエンジニアリングディレクタ、アンドリュー・クラーク(Andrew Clark)は同エンジニアリング担当副社長、マイケル・レビー(Michael Leiby)は同部長兼CTO。カリフォルニア州パロアルトに拠点を置く同社はサイレックス・システムズ・リミテッド(Silex Systems Limited)の子会社 e-mail:david@translucentinc.com; www.translucentinc.com.