28nmノードの要件を満たす半導体ウエハのアニール加工

ジェフ・ヘッブ

半導体ウエハ製造用の熱処理装置におけるもっとも最近の進歩はミリ秒アニール加工である。これは、レーザスパイクアニールとフラッシュランプアニールという二つのまったくかけ離れたアプローチによって実現するが、それぞれが用途に応じたメリットとトレードオフを備えている。

CMOSトランジスタの構成、とくに極浅接合（USJ）の活性化やケイ化物の形成などの重要な工程では、熱処理が常に重要な役割を果たしている。素子の小型化では高いドーパント活性（トランジスタの高速化）のための温度分布と、低拡散（トランジスタの小型化）のための短い加工時間の両方を可能にする半導体熱処理装置の実用化が要求されてきた。

現在、これらの重要なアニール加工は、2種類のアニール装置を使用して行われている。一つ目は、従来型の高速熱処理（RTP）方式の装置である。この装置はタングステンハロゲンランプを使用して、単一ウエハを300～1050℃の温度と1～30秒の時間スケールで加熱する。RTP法は20年以上にわたり主要な半導体製造装置の一部として使用され、130nmから始まったUSJの小型化を可能にしてきた。二つ目は、熱処理装置におけるもっとも新しい進歩であるミリ秒アニール加工である。この場合は、一般に1100～1350℃の温度（シリコンの融点よりもわずかに低い）と数百マイクロ～数ミリ秒の時間スケールでウエハが加熱される。

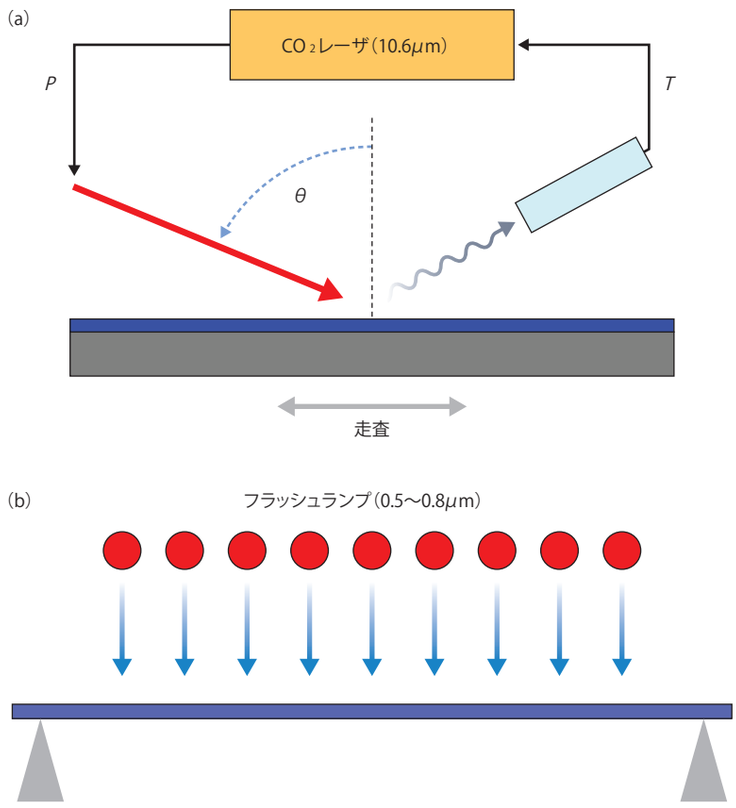

図1　長波長LSAシステム（a）と短波長FLAシステム（b）の動作機構を図解している。

アニール加工の課題

ミリ秒アニール加工（MSA）は、レーザスパイクアニール（LSA）とフラッシュランプアニール（FLA）という異なるアプローチを用いて行われる。LSAの場合は、長波長の二酸化炭素（CO_2）レーザビームをグレージング角で半導体ウエハに入射し、ウエハ面に「ラインビーム」を形成して、ウエハ全面を前後に走査する（図1）。FLAの場合は、複数のフラッシュランプを使用してウエハ全面を1回で照射し、RTPよりもはるかに速い時間スケールで加工する。いずれの方法も、USJとケイ化ニッケルの両方の形成に対して、現在および将来において解決すべき課題をかかえている。

USJの形成では、MSAは5年ほど前にロジック回路の製造に導入され、現

在は40nmと28nmのロジックノード量産の主流として使われている。最も基本的な方式では、RTPスパイクアニールとそれに続くMSAを用いて、ソース／ドレイン（SD）とソース／ドレイン拡張（SDE）の拡散と活性化が実現された[1]。RTP加工はゲートの直下にある拡張部の拡散を行ってチャネル長を設定し、また、イオン注入により発生したすべての範囲外（EOR）損傷をアニールして、接合部漏れを低減する。拡散が非常に少ないMSA加工によって、SDとSDEの両方の活性化が増強される。接合深度（チャネル長）とドーパント活性化は、本質的に分離される。デバイスサイズが小さくなると、多くの場合はスパイクRTP温度が低下するため、ドーパント拡散が減少し、短チャネル効果が発生する。このシングルステップの集積方式に加えて、製造では多段MSA集積方式も使用され、10%以上の駆動電流利得をもつトランジスタの作製も報告されている[2]。

RTPスパイクアニールとMSAによって、トランジスタのチャネル長と直列抵抗が決まるため、加工温度が非常に厳密に均一であることが要求される。RTPスパイクアニールのウエハ内における温度の均一性と再現性に対する要求は、約3℃（σ）である。MSA加工は拡散が生じないため、この加工はより広い温度範囲を許容できるが、活性化の大きな変動は歩留りの低下を引き起こす。これらの要求はウエハを監視することで対応できるが、実際のデバイス用ウエハは状況が異なる。

RTPとMSAの温度の均一性を悪化させる問題の一つに「パタン効果」がある。デバイスの細部の配置パタンから生じる光吸収の相違はチップ内温度の不均一性を引き起こし、性能と歩留りを悪化させる[3]。主として薄膜干渉から生じるパタン効果は、短波長における薄膜積層間の反射率の差が大きいと激しくなる。RTPではウエハのパタン側の直接照射を避け、パタンのない背面側から加熱する方法が実用化されている。しかし、MSAはパタン側の照射が加工の必要条件になるため、このような方法の適用は難しい。

レーザとフラッシュランプ

LSAは、特別に設計されたレーザ光源と光学系を用いることで、パタン効果が最小になる。レーザの長い波長（10.6μm）、p偏光、ブリュースタ入射角のすべてがパタン効果を劇的に減少させる。FLAは、短波長の光源（0.5～0.8μm）を使用し、反射防止（AR）コーティング、またはダミー構造をチップ上に形成して光吸収を均一状態に近づける「ダミー化」を用いてパタン効果を最小にする。ダミー化はマスクの変更が製品ごとに必要になるため、種類の少ない製品の製造に適している。ARコーティングやダミー化のない場合、FLAのパタン効果は＞100℃にもなるが、LSAのパタン効果は約10℃に収まる[4]。

デバイスサイズの小型化とともに、ICメーカーは埋め込みシリコンゲルマニウムなど、様々な方法の歪操作技術に力を入れている。MSAでは、新しい歪操作技術との互換性が解決を要する課題の一つになっている。つまり、何らかのMSA工程を導入しても、キャリア移動度に対する歪の好ましい効果が否定されず、あるいは何らかの好ましくない副作用が生まれないことが要求されている。

積極的に歪操作したウエハに対するMSAの副作用の一つとして、リソグラ

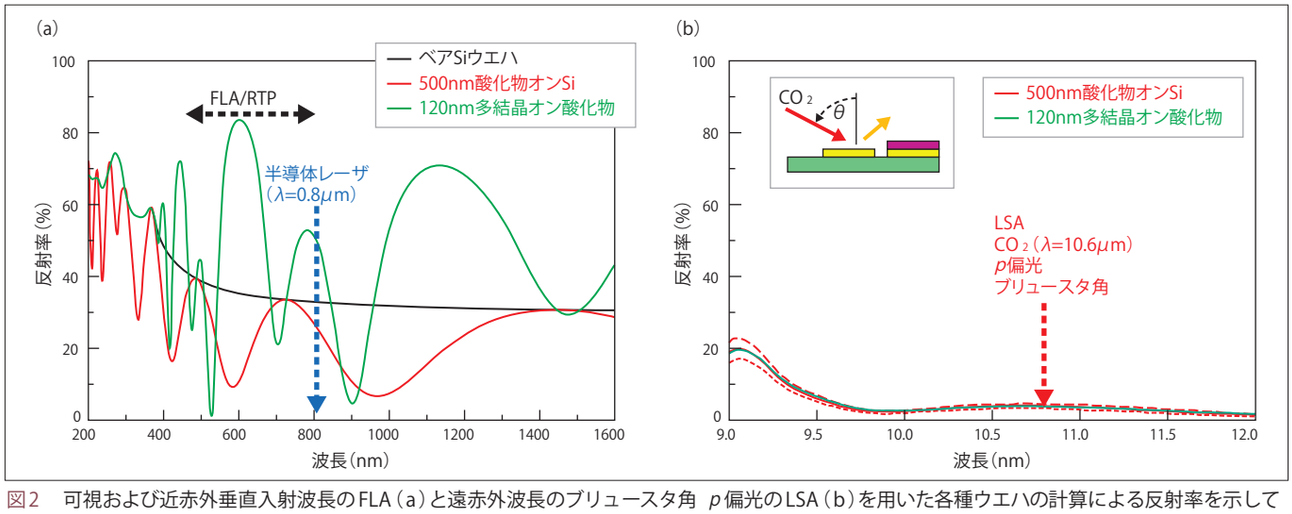

図2　可視および近赤外垂直入射波長のFLA（a）と遠赤外波長のブリュースタ角　p偏光のLSA（b）を用いた各種ウエハの計算による反射率を示している。スペクトル範囲はアニール加工法に依存して異なる。

フィしたオーバーレイには誤差が生じる。アニール加工により発生した過渡応力は転位の発生と核形成を引き起こし、このことが次のリソグラフィ加工時の塑性変形とオーバーレイ誤差の原因になる。この問題はMSAのピーク温度を下げれば解決できるが、MSAによるデバイス加工の利点が失われる。LSAの場合は、単純に加工速度を高めてアニール時間を減らすことが、製造面での一つの解決策になる[5]。もう一つ、可能性のある方法は、二つ目の幅の広いレーザビームを導入し、温度傾斜時の過渡応力を減らす「2重ビームLSA」である[6]。FLA装置の場合は、RTPランプによる背面加熱によって、温度がピークに傾斜していくときの過渡応力を低減できる。

USJが28nmスケールよりも小さくなると、RTPスパイクアニールとMSAを組合せる方法は、あまりにも大きな拡散と短チャネル効果を引き起こす。しかし、従来のMSA加工だけでは、イオン注入から接合漏れにつながるEOR損傷を取除いて、効果的にアニール加工を行うための十分な時間が得られない。そこで、MSA装置メーカーはMSA加工のプロセスウィンドウを約10msの時間領域へと広げようとしている。これは従来のMSAより一桁大きい数字だ。幸いなことに、この目標は2重ビームLSAを用いることで達成できる。欠陥アニールの場合、第2ビームの幅はCO_2ビームよりも広いため、約10msの照射が可能になる。従来の0.8msのアニールに比べると、接合漏れは4分の1に減少した(図3)。FLAの場合は、ランプの点灯時間をプログラム制御し、より長い時間プロファイルを設定することで、より長い照射時間のアニールを行うことができる[7]。

デバイススケールがさらに小さくなると、ケイ化ニッケルの形成も熱処理の新たな課題になる。従来のケイ化ニッケルの形成は、二つの低温RTP加工工程で構成されており、その工程間に選択エッチングが行われる。デバイススケールが28nm以下になると、第2のRTP加工時のニッケル拡散は接合漏れを引き起こし、歩留りが減少する[8]。この場合は第2のRTPをMSAに置き換え、加工時間を短くして、ニッケル拡散を減らすことが有効な対策になる[9]。この用途向けに市販されている二つ目の種類のレーザアニール装置は、垂直入射に近い短波長半導体レーザを使用している。

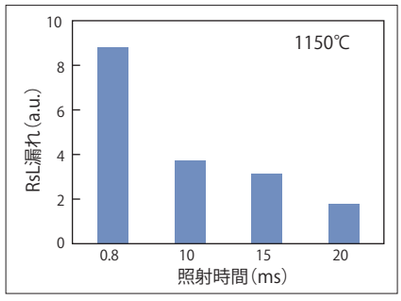

図3　全面に非晶質ゲルマニウムを被覆され500eVホウ素を注入されたウエハは、2重ビーム方式のLSAシステムを用いると、照射時間が増え、その接合漏れ(RsL)が劇的に減少する。照射時間が長い場合は第2ビームだけが使われる。

ケイ化ニッケル用途では、MSAには、低温プロセス制御(600～900℃)とケイ化金属の存在によるパタン効果という二つの新たな課題が現れる。プロセス制御について述べると、LSA装置のアーキテクチャでは、閉ループの実時間ウエハ温度制御システムを取入れ、温度範囲の変更に対する測定系と制御系の対応を可能にしている[10]。一方、FLAおよび半導体レーザアニール(DLA)システムは開ループパワーモードで稼動し、より高い製造リスクを抱えている。パタン効果について述べると、その結論はUSJへの場合と基本的に同じになる。LSA装置のアーキテクチャは、レーザと光学系の設計によって効果的にパタン効果を最小にできる。しかし、FLAとDLAは、ARコーティングやダミー化を使用しなければ、それらの短波長光源が大きなパタン効果をもたらす。

MSAとRTPは、現在の28 nmノードの場合と同様に、20nm以下のノードのロジックICにおいても、その開発と製造の要求条件を満たすために、重要な役割を果すはずである。デバイスの小型化とアーキテクチャの変化によって、進化したアニール加工に予測できない挑戦と新たなチャンスが生まれるのは必至である。MSAメーカーは、それぞれの装置の応用空間を拡大し、プロセス制御の厳しい要求に焦点を合わせて、こうした課題にうまく対応することが可能である。

参考文献
(1) S.K.H. Fung et al., Symp. VLSI Technol. Dig., 92(2004).
(2) T. Yamamoto et al., IEDM Technol. Dig., 143(2007).
(3) L.M. Feng et al., Proc. Int. Workshop Junct. Technol., 25-30(2006).
(4) T. Miyashita et al., IEDM Technol. Fig., 1-4(2009).
(5) S. Shetty et al., Proc. Int., Workshop Junct.Technol., 119(2009).
(6) Y. Wang et al., Proc. Int. Workshop Junct. Technol., 18-24(2010).
(7) H. Kiyama, Proc. Int. Workshop Junct. Technol., 25-31(2010).
(8) C. Ortolland et al., IEDM Technol. Dig., 23-26(2009).
(9) Y.W. Chen et al., Proc. IEEE Int. Conf. on Adv. Thermal Processing of Semicon., 213-216 (2009).
(10) J. Hebb et al., to be published in Proc. IEEE Adv. Semicon. Mfg . Conf.(2011).

著者紹介
ジェフ・ヘッブ(Jeff Hebb)は米ウルトラテック社(Ultratech)のレーザ製品マーケティング担当副社長。e-mail: jhebb@ultratech.com URL: www.ultratech.com

LFWJ