

パワー半導体 IGBT の深い活性化のためのトップフラットビーム・ハイブリッドレーザアニール装置の開発

Development of Top-Flat Beam and Hybrid Laser Annealing System for Deep Activation of Power Semiconductor IGBTs



清野 俊明
Toshiaki Seino



山口 芳広
Yoshihiro Yamaguchi



小林 直之
Naoyuki Kobayashi

要 旨

ハイブリッドレーザアニール装置 (HLA 装置)^{(1) (2)} は、パワー半導体 IGBT の深さ 1 ~ 3 μm の領域に位置する深いフィールドストップ (FS) 層 (リン注入層) を高活性化できることを特長としているが、本装置を生産に適用するためには、より高い生産性が求められていた。そこで、その要望に応えるために、従来のガウシアン形状のビームをトップフラット (Top Flat) 形状に改良した TF-HLA 装置を開発した。TF-HLA 装置はパルスグリーン固体レーザと CW 近赤外 LD をトップフラット形状として合波し、2 波長を同時に照射できる新方式の装置である。TF-HLA 装置の特徴は次の通りである。(1) 浅い B 注入層と深い P 注入層 (FS 層) を相互拡散させることなく同時に活性化できる。(2) 照射回数を従来の 5 回から 2 回まで低減でき、生産性を従来比で 2.5 倍にできる。(3) ウエハへの照射エネルギー量を従来比 34% まで削減してウエハへの熱ダメージを低減した。

— Synopsis —

The hybrid laser annealing (HLA) system^{(1) (2)} is characterized by being able to highly activate a deep field stop (FS) layer (phosphorus implant layer) located in a region of a power semiconductor IGBT with a depth of 1 to 3 μm . In order to apply this system to production, higher productivity was required. Therefore, in response to this requirement, we have developed a TF-HLA system which improved the conventional Gaussian shaped beam to a Top Flat shaped beam. The TF-HLA system is a new type of system that can simultaneously irradiate two wavelengths by combining a pulse green solid-state laser and a CW near-infrared LD in a top flat shape. The features of the TF-HLA system are as follows. (1) Double activation of a shallow B implant layer and a deep P implant layer (FS layer) without inter-diffusion of these dopants. (2) By reduction of the irradiated times from 5 to 2, the productivity can be increased 2.5 times compared to the conventional product. (3) By the amount of the energy irradiated to the wafer was decreased to 34% compared with conventional one, thermal damage to the wafer was reduced.

1. 緒 言

パワー半導体の代表格である IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) の性能向上は、表面構造の微細化と、高価なエピタキシャルウエハから安価なフローティングゾーン (FZ : Floating Zone) ウエハへの置き換え、及びウエハ裏面の接合 (ジャンクション) 構造の改善によるウエ

ハ厚さの薄化によって行われてきた。特に、裏面の PN 接合中の深いフィールドストップ (FS) 層 (n 型注入層) を作るための高エネルギーイオン注入技術と PN 接合を活性化するための低熱負荷アニール (Low Thermal Budget Annealing) 技術は、裏面の PN 接合形成プロセスのキー技術となっている。

当社は、深い FS 層を活性化するために、パルス幅を

1200ns まで長くしたダイオード励起固体 (Diode Pumped Solid State : DPSS) レーザの第二高調波 (波長 515nm) と、深い不純物注入エリアを効果的に加熱するために、光侵入長の長い近赤外レーザを従来のロングパルスグリーンレーザの熱アシストとして活用したハイブリッド方式のレーザアニール装置 (Hybrid Laser Anneal system : HLA 装置) を開発し、厚さ 100 μm の薄いウエハに対して、熱ダメージフリーの低熱負荷アニールプロセスを実現しながら、浅く注入されたボロン層及び深く注入されたリン層を相互拡散させることなく同時に活性化できることを報告した⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、生産機として本装置を使用するためには高速で生産できる装置の要望が高い。そこで、スキャン方向のビーム形状をガウシアン形状から均一なトップフラット形状とするトップフラットビームのハイブリッド方式レーザアニール装置 (Top Flat - Hybrid Laser Anneal system:TF-HLA 装置) を開発し、従来と同等の活性化性能を実現しながら、従来必要としていたスキャン方向の照射回数 5 回を 2 回まで低減した。本報では開発した装置の概要と試験結果について報告する。

2. TF-HLA 装置の開発

従来の HLA 装置は、波長 532nm のパルスグリーンレーザと波長 808nm の近赤外連続発振 (CW : continuous wave) レーザの 2 波長光源をウエハへ同時に照射できることを特徴としている。本装置は、2 波長のレーザ光源、レーザビームを整形するための光学系、シリコンウエハを移動するための XY ステージ、レーザパワーを測定するパワーメータとビーム形状を測定するプロファイラー、及びこれらを制御するシステムコントローラで構成される。異なる波長の 2 つのラインビームはダイクロイックミラーで合成され、ウエハ表面で結像される。XY ステージ上のパキウムチャックで保持されたシリコンウエハを一定速度で移動しながら、これら 2 波長の合成ラインビームを同時に照射してシリコンウエハ全面を熱処理する⁽¹⁾⁽²⁾。

この従来装置のスキャン方向のビーム形状は図 1 のガウシアン形状であった。シリコンウエハ中の不純物を活性化するためには一定以上の温度と時間を与える必要がある。ウエハ表層の温度はレーザビーム形状に依存し、ガウシアン形状ではピークの尖頭値で照射された部分の温度が最も高くなる。そのため、ウエハ全体の処理温度を一定以上にするためには、ウエハ全面に尖頭値近傍のビーム強度で照射する必要がある。ここで、レーザのワンパルス毎のウエハに対する移動量を送りピッチとすると、図 1 に示す従来のガウシアンビームでの送りピッチは 6.6 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ 以下とする必要があった。これは、照射回数を「ビーム幅 (半値幅) / 送りピッチ」とすると、5 回以上を必要とする結果であった。

図 1 に示すように、ビーム幅 6.6 μm はガウシアンビームの尖頭値強度の 96.7% に相当し、この領域 (灰色部分) はビームの面積 (エネルギー) 比で 19% である。残りの 81% に相当するエネルギーはウエハ表層を所望の温度まで上昇させることができないためプロセスへの寄与が小さいばかりか、無用に熱容量の限られる薄ウエハの温度を上昇させる弊害を持つ。そのためビーム形状はトップフラット型の方が効率的である。

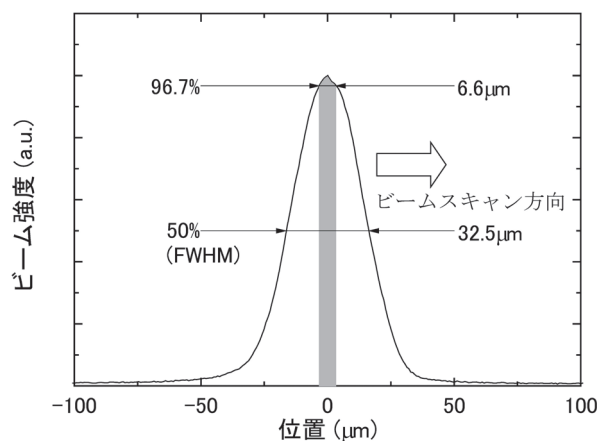


図 1 レーザアニール装置のビーム形状 (従来)

そこで、半値幅 80 μm の矩形トップフラット型及びガウシアン型のビームをシリコンウエハに照射したときの深さ方向の温度分布を熱伝導解析により計算した。その結果を図 2 に示す。トップフラットビームであれば、深さ 3 μm での温度分布からビーム幅の約 50% (40 μm) で、最高温度から -3% 以内の均一温度での熱処理が可能であることがわかる。一方で、ガウシアンビームでは、深さ 3 μm での温度分布からビーム幅の約 20% (16 μm) のみ、最高温度から -3% 以内の均一温度での熱処理となることがわかる。この結果から、トップフラットビームの送りピッチはビーム幅の 50%、照射回数 2 回で活性化に必要な温度がウエハ全面に得られること、ガウシアンビームでは送りピッチはビーム半値幅の 20%、照射回数 5 回が必要であることがわかる。この計算結果は従来の照射回数 5 回を 2 回に半減できることを示しており、2.5 倍の生産性が得られると期待できる。

開発した光学系で成形したトップフラットビームのプロファイルを図 3 に示す。固体レーザは可干渉性が高いためにトップフラット形状に整形すると干渉縞が見られるが、本光学系は可干渉性を低減する工夫をすることで、干渉縞の見られない均一なビーム形状が得られた。

3. 実験

3.1 イオン注入試料

本装置の性能を調べるために、厚さ 150 μm の (100) n 型シリコンウエハを用意し、初め深い領域に不純物リン (P) を加速エネルギー 750keV、ドーズ量 $1.0\text{E}+14/\text{cm}^2$ で注入し、次に浅い領域にボロン (B) を加速エネルギー 40keV、ドーズ量 $1.0\text{E}+15/\text{cm}^2$ で注入した。本稿では、すべての試験でこのテストウエハを使用した。

3.2 不純物活性化と評価

図 3 に示したトップフラットビームで、テストウエハに注入された不純物原子 B と P の同時活性化を行った。ワンパルス毎に送りピッチ 25 ~ 83 μm (照射回数: 4 ~ 1.2 回) で短軸に沿ってスキャンし、折り返し点で長軸に沿って移動してウエハ全面を熱処理した。グリーンレーザのパルス幅は 1200ns に固定して照射した。CW ダイオードレーザのパワー密度は、パルスグリーンレーザのエネルギー密度毎に最適条件を選定した。

アニール後の試料の分析に関しては、深さ方向の不純物濃度分布を SIMS (Secondary Ionization Mass Spectrometer: 2 次イオン質量分析法) で、及び活性化された不純物濃度分布を SRP (Spreading Resistance Profiling Method: 広がり抵抗測定法) で行った。PN 接合深さを基点にして、SRP の深さプロファイルの積分から得られる活性化された不純物原子の総数を、イオン注入した不純物原子のドーズ量で割り算して各注入不純物原子の活性化率を算出した。ここでは SRP 深さプロファイルの中でキャリアの電荷極性が反転する位置を PN 接合の深さと定義した。

3.3 Si ウエハの溶融時間の評価

レーザ照射時の表面状態をモニターするため、レーザ照射時の溶融・固化の過程を観測することができる TR (Transient Reflectance) モニターを設置した⁽³⁾。後述のとおり、表面を溶融させたときに平滑な表面が得られ、溶融時間が最適の時に、適正な PN 接合深さで深くイオン注入した P が活性化した。そのため、TR モニターでの溶融時間を観測することで、活性化結果を予測して必要な活性化が得られたと考えられる試料を作製し、その試料を SIMS と SRP にて評価した。レーザ照射後の表面形状は SPM (Scanning Probe Microscope) にて評価した。

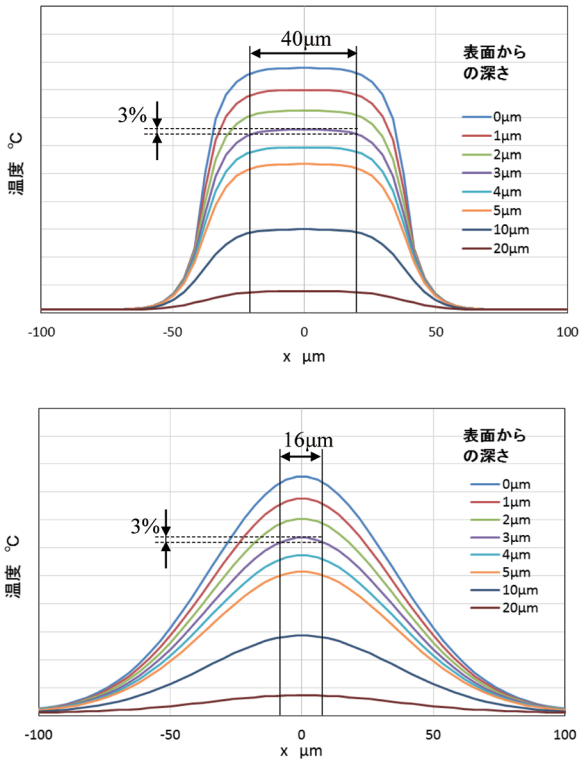


図 2 トップフラットビーム (上図) 及びガウシアンビーム (下図) を照射したときのウエハ面内と深さ方向の温度分布 (計算値)

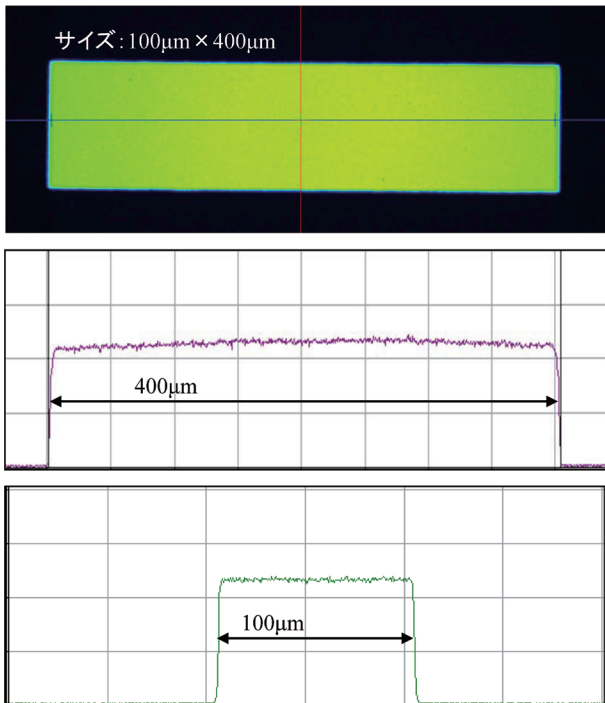


図 3 開発した光学系により成形したビーム形状

4. 結果及び考察

4.1 活性化プロファイルのエネルギー密度依存性

レーザのエネルギー密度を変えたときの活性化プロファイルへの影響を調査するため、グリーンレーザをエネルギー密度（以下、EDgとする）： $3.5 \sim 5.0 \text{ J/cm}^2$ 、照射回数：3回の条件でレーザ照射した。このとき近赤外レーザのパワー密度（以下、PDrとする）はグリーンレーザのエネルギー密度毎に最適条件を選定した。図4にSIMSとSRPで評価した深さプロファイルを、表1にSRP深さプロファイルの積分値から算出した各注入不純物の活性化率と、PN接合深さの数値を示す。P層の活性化率は、EDgによらず、PDrを調整すれば十分な活性化を得ることができた。Bの活性化率は、EDg = 3.5 J/cm^2 で74%と高く、EDg = $4.0, 5.0 \text{ J/cm}^2$ で50~60%であった。PN接合深さはEDgが高いほど深くなる結果であった。このことから、Bの活性化率を高くするためには、EDgを低め（ 3.5 J/cm^2 程度）に設定し、一方でBをBOXプロファイルにするためにはEDgを高め（ 4.0 J/cm^2 以上）に設定することで、所望のプロファイルに調整できる。

4.2 活性化プロファイルの照射回数依存性

図4及び表1よりEDg = 4.0 J/cm^2 では、レーザ照射前のBとPが同じ濃度になる深さと、レーザ照射後のSRP分析から得たPN接合深さが同じであり、さらに最もPの活性化率が高かった。そこで、EDg = 4.0 J/cm^2

で一定として、照射回数1.2~4回の条件にて照射したときの活性化プロファイル結果を図5に、各注入不純物の活性化率を表2に示す。

照射回数はウエハのスキャン速度を変えることで調整した。近赤外レーザはCWレーザのためスキャン速度が変わると照射される熱量が変わる。そのため、照射回数毎にPN接合深さを維持した条件で、深いP層の活性化率が最大になるようパワー密度を調整した。図5より、注入されたB層とP層は相互に拡散せずに同時に活性化されていることが分かる。特に深いP注入層の活性化率に着目すると、照射回数2回で98%を達成し、照射回数4回の100%に対し、同等の活性化率を実現した。このことから、従来法では5回照射を必要としていたが、TF-HLA装置では2回照射で深さ1~3 μm の領域に位置する深いPの高活性化が可能であることが実証された。従って、従来装置の2.5倍の高生産性を達成できる。

一方、照射回数1.2回の活性化率は60%の結果であった。これは図2の計算結果より照射回数1.2回では活性化に不十分な温度領域があったことが影響していると考えられる。

ここで、EDg = 4.0 J/cm^2 のときのBの活性化率が50~60%程度である理由について調べるため、図5のEDg : 4.0 J/cm^2 、PDr : 40 kW/cm^2 、2shotで活性化した試料のSIMS深さプロファイルを測定した。その結果をSRP深さプロファイルと併せて図6に示す。BはSRP深さプロファイルで測定したPN接合深さの0.5 μm まで溶融拡散し

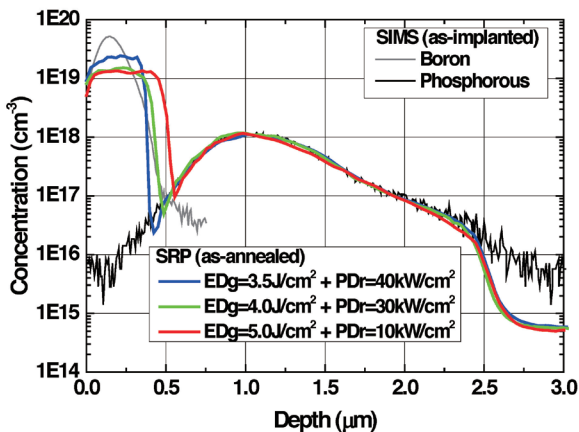


図4 SIMS及びSRP深さプロファイル (EDg依存性)

表1 活性化率とPN接合深さのエネルギー密度依存性

エネルギー密度 [J/cm^2]	パワー密度 [kW/cm^2]	活性化率 [%]		PN接合深さ [μm]
		B	P	
3.5	40	74	95	0.42
4.0	30	51	100	0.49
5.0	10	58	91	0.56

照射回数：3回

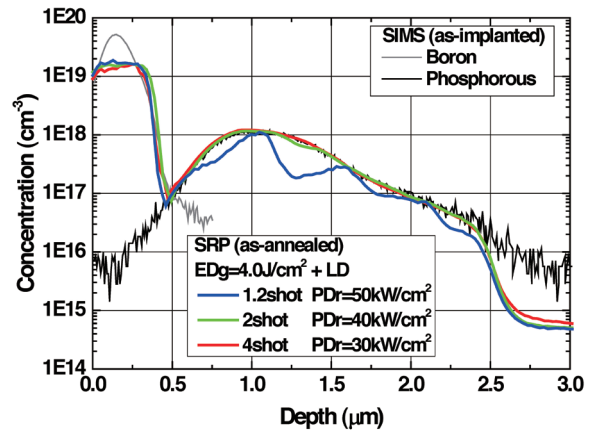


図5 SIMS及びSRP深さプロファイル (照射回数依存性)

表2 活性化率とPN接合深さの照射回数依存性

照射回数 [回]	パワー密度 [kW/cm^2]	活性化率 [%]		PN接合深さ [μm]
		B	P	
1.2	50	56	60	0.46
2	40	57	98	0.49
4	30	47	100	0.47

グリーンレーザのエネルギー密度：4 J/cm^2

て BOX プロファイルを形成しているが、深さ 0.3 μm 以上では B の活性化率が低いことがわかった。EDg が高いとき、B はイオン注入時のプロファイルより深く溶融拡散しており、溶融拡散部の深い領域の B が活性化していないことが、活性化率が 50 ~ 60% となっている理由と考えられる。

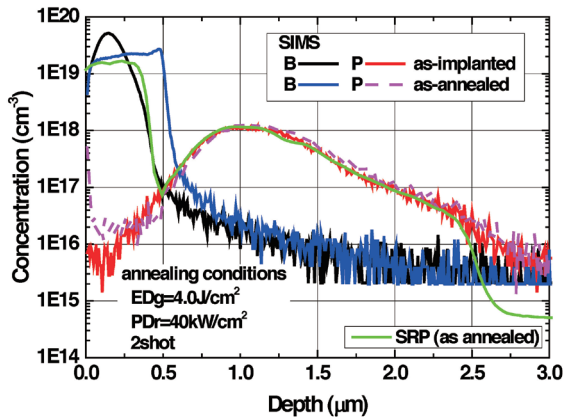


図6 SIMS 及び SRP 深さプロファイル

4.3 ウエハへの照射エネルギー量の低減

ここで、ウエハの 1 か所あたりに照射したレーザのエネルギー量を HLA 装置 (従来法) と TF-HLA 装置 (本報) で比較した。その結果を表 3 に示す。

表 3 ウエハに照射したレーザのエネルギー量

ビーム形状		HLA 装置	TF-HLA 装置
		ガウシアン	トップフラット
波長	EDg	4J/cm ²	4J/cm ²
532nm	照射回数	5 回	2 回
パルス	照射 EDg	20J/cm ²	8J/cm ²
808nm	PDr	55kW/cm ²	40kW/cm ²
CW	照射時間	0.5ms	0.2ms
	照射 EDr	27.5J/cm ²	8J/cm ²
照射エネルギー量		47.5J/cm ²	16J/cm ²

EDg: グリーンレーザ (532nm) のエネルギー密度

PDr: 近赤外レーザ (808nm) のパワー密度

EDr: 近赤外レーザ (808nm) のエネルギー密度

近赤外レーザは連続発振レーザのため、照射するエネルギー密度: EDr [J/cm²] はパワー密度 PDr [W/cm²] と照射時間の積である。レーザのウエハに対するスキャン速度は送りピッチに比例するため、照射回数が少なくなるとスキャン速度が速くなり、照射時間は短くなる。そのため、照射回数が少ないとウエハに照射されるエネルギー量は少なくて済む。表 3 よりトップフラットビームは、従来のガウシアンビームの方法と比べて照射エネルギー量を約 34% に低減できたことがわかる。本報の TF-HLA 装置で

は、ウエハへ照射するエネルギー量が大きく低減されたことで、ウエハ裏面への熱ダメージを大幅に低減でき、より熱容量が小さくウエハ裏面の温度上昇が起きやすい薄ウエハの、さらなる薄化に対応できる。

4.4 TR モニターによる表面溶融時間のモニタリング

図 4 の照射回数 3 回の照射条件において測定した、TR モニターの結果を図 7 に示す。TR モニターは、固体と液体のシリコンで反射率が変化することを利用して、溶融している時間を知ることができる。固体状態では反射率が低く、溶融状態 (液体) では反射率が高くなる。図 7 の結果より、レーザのパルス幅 (1200ns) より長い 1600 ~ 1900ns で反射光強度が高くなっており、レーザのパルス幅より長い時間で表面が溶融していたことがわかる。溶融時間が長いと PN 接合深さは深くなり、より深く溶融していると推測できる。図 4 の条件は溶融時間 1600 ~ 1900ns をターゲットとして、図 5 の条件は溶融時間 1850ns 程度をターゲットとして、TR モニターで条件を決定した。

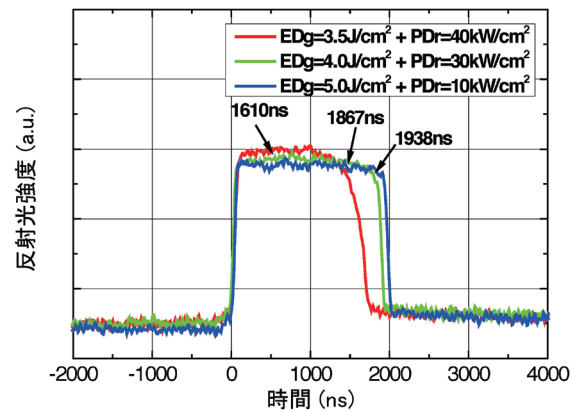


図7 TR モニターの計測結果

4.5 レーザアニール後の表面形状の観察

レーザ照射により深さ 0.5 μm 程度まで溶融したと考えられる図 6 の試料について、SPM により再結晶化後の表面形状を測定した。比較のため、レーザ未照射のシリコンウエハの表面形状も測定した。図 8 の SPM 測定結果が示すようにレーザ照射後試料の表面は非常に平滑であった。形状像からは、レーザ照射後では若干の起伏があるように見えるが、オリジナルのシリコンウエハ表面では P-P (Peak-to-Peak) が 0.6nm 程度であったのに対して、レーザ照射後の表面は P-P が 1.0nm 程度であり、遜色ない平坦性と言える。レーザ照射後の表面が平坦化する理由として、以下のメカニズムにより良質なシリコン単結晶が形成されたためと考えている。レーザ照射により一旦表層から 0.5 μm 深さ程度のシリコンが溶融、レーザパルスからの熱供給が絶えると急冷却により溶融部の温度が低下、溶融部下層の固体の

単結晶シリコンからエピタキシャル成長することで、良質なシリコン単結晶が再結晶化したためと考えられる。

参 考 文 献

- (1) 清野俊明, 山口芳広, 小林直之, 工藤利雄, 佐野一也: “パワー半導体 IGBT の深い活性化のためのハイブリッドレーザアニール装置の開発”, 日本製鋼所技報, No.63 (2012), p.102
- (2) T. Seino, Y. Arai, N. Kobayashi, T. Kudo and K. Sano: “Backside Activation of Power Device IGBTs by Microsecond-Pulsed Green Laser Annealing Thermally Assisted with CW Diode Laser”, Proceeding of 18th IEEE RTP 2010, p.140.
- (3) S. Higashi, T. Sameshima: “Pulsed-Laser Induced Microcrystallization of Silicon Thin Films”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 (2001) p.480-485.

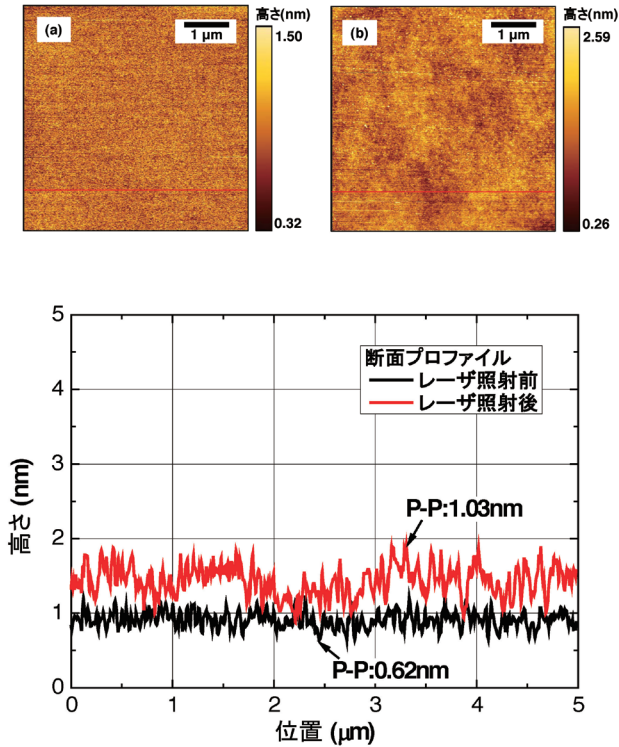


図8 レーザアニール前後の表面形状 (SPM)
 (a) レーザ照射前の形状像
 (b) レーザ照射後の形状像

5. 結 言

IGBT の裏面活性化用途として、波長 532nm のロングパルスグリーンレーザを波長 808nm の近赤外 CW ダイオードレーザで熱アシスト (予備加熱) したハイブリッド方式のレーザアニール装置 (HLA 装置) の生産性を向上するため、ビーム形状をガウシアンからトップフラットとしたトップフラット形状のハイブリッド方式レーザアニール装置 (TF-HLA 装置) を開発し、その活性化試験を実施した。TF-HLA 装置の特長は以下の通りである。

- (1) 浅く注入された B 層及び深く注入された P 層を相互拡散させることなく同時に活性化できる。
- (2) 照射回数は従来の 5 回から 2 回まで低減でき、生産性を 2.5 倍にできる。
- (3) ウエハへの照射エネルギー量を従来法と比べて 34% まで削減すると共にウエハ裏面への熱ダメージを大幅に低減できる。

新しく開発した TF-HLA 装置は、高い生産性と低熱負荷で、IGBT の生産能力向上に貢献し、さらなる薄型化が進む極薄ウエハ裏面アニールプロセスに対応できる。