

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5175416号
(P5175416)

(45) 発行日 平成25年4月3日 (2013.4.3)

(24) 登録日 平成25年1月11日 (2013.1.11)

(51) Int. Cl.

F I

B 2 3 K 26/00 (2006.01)

B 2 3 K 26/00 N

H O 1 L 21/302 (2006.01)

H O 1 L 21/302 2 O 1 B

H O 1 S 3/00 (2006.01)

H O 1 S 3/00 B

B 2 3 K 101/36 (2006.01)

B 2 3 K 101/36

請求項の数 44 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2001-548238 (P2001-548238)	(73) 特許権者	501413552
(86) (22) 出願日	平成12年12月19日 (2000.12.19)		ジーエスアイ ルモニクス インコーポレ
(65) 公表番号	特表2003-518440 (P2003-518440A)		イテッド
(43) 公表日	平成15年6月10日 (2003.6.10)		カナダ国 オンタリオ ケイ7ケイ 1ワ
(86) 国際出願番号	PCT/US2000/034470		イ3 カナタ シュナイダー ロード 1
(87) 国際公開番号	W02001/047659		05
(87) 国際公開日	平成13年7月5日 (2001.7.5)	(74) 代理人	100059959
審査請求日	平成19年12月13日 (2007.12.13)		弁理士 中村 稔
(31) 優先権主張番号	09/473,926	(74) 代理人	100067013
(32) 優先日	平成11年12月28日 (1999.12.28)		弁理士 大塚 文昭
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100082005
			弁理士 熊倉 禎男
		(74) 代理人	100065189
			弁理士 宍戸 嘉一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 標的材を処理するエネルギー効率に優れたレーザーベースの方法およびシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

特定寸法を有している標的材料をレーザーを利用して処理する方法であって、
種光源であるシードレーザーを利用して、或るパルス反復率で、レーザーパルスを発生する段階であって、前記パルスの列のパルスの各々が、所定の形状を有している段階と、
前記パルスの列を光学的に増幅して、増幅されたパルスの列を得る段階と、
前記標的材料の上の1 μm乃至4 μmの範囲の大きさを有する点に、前記増幅されたパルスの列の少なくとも一部を、収束して、供給する段階から成り、
前記増幅されたパルスの立上がり時間が、レーザーエネルギーを前記標的材料に結合するが、前記標的材料の周囲構造及び下層構造への損傷を防止するよう、高速であり、前記増幅されたパルスの各々が時間軸に沿って矩形のパワー密度分布を有しており、パルス持続時間が前記標的材料を加熱気化するように前記標的材料の寸法に基づいており、前記増幅されたパルスの各々の立上がり時間及び降下時間が前記パルス持続時間の2分の1よりも短いことを特徴とする、前記方法。

【請求項 2】

前記標的材料がミクロンオーダの構造体である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記ミクロンオーダの構造体が導電線である、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記導電線は金属線であり、前記パルス持続時間は金属線の特定部分を融除するのに十

分な長さである、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記標的材料は半導体装置の一部である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記標的材料を包囲している材料の少なくとも一部は基板である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記半導体がマイクロマシン装置である、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 8】

前記立上がり時間は 2 ナノ秒よりも短い、請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 9】

前記立上がり時間は 1 ナノ秒よりも短い、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 10】

前記パルス持続期間が 10×10^{-9} 秒より短い、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

前記標的材料を処理するのに、1 個の増幅されたパルスで十分である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 12】

前記標的材料は、増幅されたパルスに対して反射性を有しており、該増幅パルスの出力密度は、増幅されたパルスに対する標的材料の反射率を低減するとともにレーザーエネルギーを標的材料に結合させるのに十分なだけの高さである、請求項 1 に記載の方法。

20

【請求項 13】

各パルスの時間軸に沿ってのパワー密度分布がパルス持続時間の 10 パーセントの範囲内まで均一である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 14】

前記標的材料を包囲している材料の光特性と熱拡散特性が、標的材料のこれらに対応する諸特性とは異なっている、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 15】

前記増幅されたパルスは各々が少なくとも 0.1 マイクロジュールから 3 マイクロジュールまでのエネルギーを有している、請求項 1 に記載の方法。

30

【請求項 16】

光学的に増幅させる前記工程は少なくとも 20 dB の利得を供与する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 17】

増幅されたパルスの各々のピーク出力が立上がり時間と降下時間の間で一定である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 18】

前記増幅されたパルスは各々が後端部を有しており、上記方法はまた、増幅されたパルスの後端部でレーザーエネルギーを減衰させて、増幅されたパルスの降下時間を低減させると同時に、パルスの出力量を維持するようにした工程を更に含んでいる、請求項 1 に記載の方法。

40

【請求項 19】

前記後端部の前記減衰されたレーザーエネルギーは、パルス持続時間の 1.5 倍の範囲内では少なくとも 20 dB 分だけ減衰される、請求項 18 に記載の方法。

【請求項 20】

前記特定寸法は前記レーザー波長よりも短い、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 21】

前記点は 1 μm から 4 μm の範囲の寸法を有している、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 22】

前記降下時間は 2 ナノ秒よりも短い、請求項 1 に記載の方法。

50

【請求項 2 3】

各々が所定の形状を有するレーザーパルスを或るパルス反復率で発生する種光源としてのシードレーザー、前記パルスの列を光増幅させて増幅されたパルスの列を得るレーザー増幅器（10）、及び増幅されたパルスの列の少なくとも一部を標的材料（25）上の1 μm 乃至4 μm の範囲の大きさを有する点に搬送且つ合焦するビーム搬送合焦サブシステム（12）とを備え、特定寸法を有している標的材料をレーザーを利用して処理するシステムであり、

前記増幅されたパルスの立上がり時間が、レーザーエネルギーを前記標的材料に結合するが、前記標的材料の周囲構造及び下層構造への損傷を防止するよう、高速であり、前記増幅されたパルスの各々が時間軸に沿って矩形のパワー密度分布を有しており、前記増幅されたパルスのパルス持続時間が前記標的材料を加熱気化するように標的材料の寸法に基づいており、前記増幅されたパルスの立上がり時間及び降下時間が前記パルス持続時間の2分の1よりも短いことを特徴とする、前記システム。

10

【請求項 2 4】

前記標的材料がミクロンオーダーの構造体である、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 2 5】

前記ミクロンオーダーの構造体が導電線である、請求項 2 4に記載のシステム。

【請求項 2 6】

前記導電線は金属線であり、前記パルス持続時間は金属線の特定部分を融除するのに十分な長さである、請求項 2 5に記載のシステム。

20

【請求項 2 7】

前記標的材料は半導体装置の一部である、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 2 8】

前記標的材料を包囲している材料の少なくとも一部は基板である、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 2 9】

前記半導体がマイクロマシン装置である、請求項 2 7に記載のシステム。

【請求項 3 0】

前記立上がり時間は2ナノ秒よりも短い、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 3 1】

前記立上がり時間は1ナノ秒よりも短い、請求項 2 3に記載のシステム。

30

【請求項 3 2】

前記パルス持続期間が 10×10^{-9} 秒より短い、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 3 3】

前記標的材料を処理するのに、1個の増幅されたパルスで十分である、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 3 4】

前記標的材料は、増幅されたパルスに対して反射性を有しており、該増幅パルスの出力密度は、増幅されたパルスに対する標的材料の反射率を低減するとともにレーザーエネルギーを標的材料に結合させるのに十分なだけの高さである、請求項 2 3に記載のシステム。

40

【請求項 3 5】

各パルスの時間軸に沿ってのパワー密度分布がパルス持続時間の10パーセントの範囲内まで均一である、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 3 6】

前記標的材料を包囲している材料の光特性と熱拡散特性が、標的材料のこれらに対応する諸特性とは異なっている、請求項 2 3に記載のシステム。

【請求項 3 7】

前記増幅されたパルスは各々が少なくとも0.1マイクロジュールから3マイクロジュールまでのエネルギーを有している、請求項 2 3に記載のシステム。

50

【請求項 38】

前記レーザー増幅器は少なくとも20dBの利得を供与する、請求項23に記載のシステム。

【請求項 39】

増幅されたパルスの各々のピーク出力が立上がり時間と降下時間の間で一定である、請求項23に記載のシステム。

【請求項 40】

前記増幅されたパルスは各々が後端部を有しており、上記方法はまた、増幅されたパルスの後端部でレーザーエネルギーを減衰させて、増幅されたパルスの降下時間を低減させると同時に、パルスの出力量を維持するようにした工程を更に含んでいる、請求項23に記載のシステム。

10

【請求項 41】

前記後端部の前記減衰されたレーザーエネルギーは、パルス持続時間の1.5倍の範囲内では少なくとも20dB分だけ減衰される、請求項40に記載のシステム。

【請求項 42】

前記特定寸法は前記レーザー波長よりも短い、請求項23に記載のシステム。

【請求項 43】

前記点は1 μmから4 μmの範囲の寸法を有している、請求項23に記載のシステム。

【請求項 44】

前記降下時間は2ナノ秒よりも短い、請求項23に記載のシステム。

20

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、標的材を処理するための、エネルギー効率に優れた、レーザーベースの方法およびシステムに関するものである。特に、本発明は、半導体基板上の回路素子の一部を融除し、或いは、これ以外の変化をさせるパルス式レーザービームの用途に関連しており、メモリ修復を目的として、金属、珪化物重合体、および、シリコン重合体の接合部を気化させる処理に特に適用できる。とりわけ、周囲の領域および基板に損傷を与えることなく、非同質性の光特性または熱特性を有していることが多い微小な構造体を融除し、或いは、変化させるのが望ましい場合のマイクロ加工および他の修復作業においては、また別

30

【0002】

【従来の技術】

メモリのような半導体装置は、通例、主要シリコン基板により支持された、酸化シリコンのような透明な絶縁体層に導電接合部が固着されている。このような半導体装置のレーザー処理の間、ビーム部が接合部または回路素子に入射している最中は、幾分かのエネルギーが基板または他の構造体にも達している。ビームの出力や、ビームの適用の時間の長さや、その他の動作パラメータ次第で、シリコン基板および／またはその隣接部が過熱状態となり、損傷を受けることがある。

40

幾つかの先行技術の引例が、基板の損傷抑制についての重要なパラメータとして波長選択の重要性を教示している。米国特許第4,399,345号、第5,265,114号、第5,473,624号、第5,569,398号は、1.2 μmを越える範囲の波長を選択してシリコン基板の損傷を回避する利点を開示している。

上述の第'759号特許の開示はシリコンの波長特性に関して更に入念に説明している。シリコンにおける吸収率は、室温で約1.12ミクロンまで吸収率の急上昇を見せて約1ミクロンに落ち着いたあと、急速に下落する。1.12ミクロンよりも大きい波長では、シリコンは一層容易に導電作用を生じ、従って、シリコンから材料を除去すると同時に、より良好な部分歩留まりを得ることが可能である。約1ミクロンの範囲では、吸収係数は4桁の大き

50

さの係数分だけ減少し、0.9ミクロンから1.2ミクロンへ移行する。標準のレーザー波長が1.047ミクロンから1.2ミクロンへ移行すると、曲線は2桁の大きさの下落を示す。これは、波長の極めてわずかな変化に対する激烈な吸収率変化を示している。従って、基板の吸収率の立上がり端縁を越える波長でレーザーを作動させると基板への損傷をうまく回避し、これは、接合部に関してレーザービームがわずかに不整合である場合、或いは、合焦点が接合部構造を超えて外に延びている場合には、特に重要と成る。更に、処理中に基板温度が上昇すると、吸収曲線の推移は、熱暴走状態や破局的損傷に至る可能性のある赤外線領域内へと進むことになる。

【0003】

液晶修復の問題は金属接合部の融除の問題に類似している。吸収比率を最大限にする波長選択の原理は、同じ目的では、すなわち、基板を損傷せずに金属を除去することを目的とした場合には、前述の開示内容に類似する態様で緑色の波長領域に適用されるのが有利であった。フロロッド (Florod) から製造されているシステムが「キセノンレーザー修復用液晶表示装置 (Xenon Laser Repairs Liquid Crystal Displays)」と題する出版物、「レーザーズ・アンド・オプトロニクス (Lasers and Optronics)」39頁から41頁 (1988年4月刊行) に記載されている。

波長選択が有利であることが実証されたので、他のパラメータを調節してレーザー処理ウィンドウを改善させることができることが認識されている。例えば、エル・エム・スカーフオン (L.M. Scarfone) およびジェイ・ディー・クリパラ (J.D. Chlipala) 著の1986年刊行版の371頁の「シリコンメモリのレーザープログラム可能な余剰領域における標的接合部爆破のコンピュータシミュレーション (Computer Simulation of Target Link Explosion in Laser Programmable Redundancy)」において、「接合部除去過程ごとにレーザー波長および多様な材料厚さを選択して吸収率を向上させ、他の部分で吸収率を低下させて、構造体の残存部に損傷を与えるのを防止するのが望ましい」旨が注記されている。本件出願人が共著者となっている「線形モノリシック回路のレーザー調整 (Laser Adjustment of Linear Monolithic Circuit)」と題するリトウイン (Litwin) およびスマート (Smart) 著の100/アメリカレーザー協会 (LIA) 会報38号、ICAELO刊 (1983年) の論文にあるように、一般的に接合部または回路素子の下方により厚い層が存在している有用性と、加熱用パルスの持続時間を制限することの有用性も認識されている。

第759号特許は、より長い波長を選択することで生じる見返りについて、特に、Nd:YAGレーザーから得られるスポット寸法、焦点深度、パルス幅に関する妥協点について教示している。これらパラメータは、より高い精度でのレーザー処理について、また、周囲の構造体への付帯的損傷の恐れが存在する場合のレーザー処理について、決定的な重要性を備えている。

【0004】

事実、産業界が継続して推進している目標が、より高密度のマイクロ構造と、これに関連する、深さまたは横方向寸法が1ミクロンの何分の1かである幾何学的構造であるため、処理ウィンドウの幅を広げる改良はいずれも有利である。エネルギー制御と標的吸収率の公差は、この尺度でマイクロ構造を処理するのに必要なエネルギーと比較して、大きくなっている。上述の説明から、レーザー処理パラメータが、約1 μm の小さいレーザースポットを要件としているマイクロ加工の応用例では必ずしも互いに無関係とは言えないことに注目するべきである。具体的には、一般に、例えば1.2 μm などの短い波長を利用してスポット寸法およびパルス幅を最小限にしても、吸収率のコントラストは最大にはならない。半導体装置の製造業者は、過去に開発された製品を製造しながら、異なる構造および異なる過程を通例採用している、より進んだ改良版の製品を開発し市場参入させるのが常套的である。大半の現行のメモリ製品は珪化物重合体またはシリコン重合体の接合部を利用しながら、金属製のより小型の接合構造を用いて、256メガビットメモリのような一層進んだ製品を得ている。0.3ミクロンから0.5ミクロンの薄い酸化シリコン層の上に在る1ミクロン幅で3分の1ミクロン深さの接合部がこのような大型メモリに現在も利用されている。従来、製造施設は、1.047 μm から1.32 μm の従来の波長のQスイッチ制御によるダイ

オードポンプ式YAGレーザー、および、その波長で作動可能な関連装備と、シリコンによりより低い吸収率を得ると認識されている波長領域で作動可能な関連装備とを利用してきた。しかし、こういった利用者は、融除部位付近の導電性残留物または汚染物質のせいで後ほどチップ欠損が生じる危険も無く接合構造を清浄に剪断する成果を生む装備改良による恩恵を認識している。

【0005】

上記以外の自由度として、レーザーパルスエネルギー密度（標的まで搬送される）とパルス持続時間とが挙げられる。先行技術では、パルス幅を制限してマクロ加工応用例において損傷回避を図るべきであることが教示されている。例えば、米国特許第5,059,764号では、Qスイッチ制御のレーザーシステムを利用して、とりわけ、約10ナノ秒から50ナノ秒の比較的短いパルスを生成するレーザー処理ワークステーションが開示されている。材料処理の各応用例（接合部のブロー成形や高精度型彫による半導体メモリ修復など）については、出力パルス幅が比較的短くなるようにするべきであり、50ナノ秒よりも短い、30ナノ秒などのパルス幅が大半の応用例で必要となることが開示されている。パルス幅を適切に選択することで融除処理（溶融処理を行わない蒸発処理）が可能となる。

高速パルス式レーザ設計はQスイッチ制御動作、利得スイッチ制御動作、または、モードロック式制御動作を利用することができる。標準のQスイッチ制御式パルスレーザおよび他のパルス式レーザのパルス持続時間とパルス形状は、パルスの開始時の継続する閾値に相対する母集団反転と光子数密度を記述している結合率の等式を積分することにより、基本レベルに近似される。Qスイッチ制御の事例については、基準化された尺度に基づき、閾値に対する反転母集団中の原子数が多いほど、パルスの立上がり時間が速く、パルス幅は狭く、ピークエネルギーが高くなる。この比率が減少するにつれて、パルス形状が広くなるのに伴って、エネルギー密度も低くなる。

【0006】

Qスイッチ制御式レーザーパルスはガウス時間分布か、或いは、ガウス形と指数関数的減衰後端部との混合に酷似していることが多い。第'759号特許に開示されているように、より短い波長のダイオードポンプ式システムは、半出力点（すなわち、パルス持続時間の標準指定）で測定された場合で、尚且つ、有利な波長領域で作動された場合には、約10ナノ秒という比較的短いパルスを生成することができる。動作がうまくいっているにもかかわらず、本件出願人は、標準ダイオードポンプ型Qスイッチレーザーシステムの時間パルス計上特性に關与する制約を幾つか見出しており、その制約とは、具体的には、実際の立上がり時間の制約、互いに隣接する半値点の間の出力分布、および、パルス減衰特性のことであるが、これらは、本発明の方法およびシステムを利用して改善されると、金属接合部をブロー成形処理する適用例では顕著に向上した結果をもたらした。

本件明細書の残余の部分も含め、「パルス成形」という語は、「形状」という語が時間の関数として検出器で表される出力に言及している場合に、電磁放射の検出器で検出されるレーザーパルスの発生について述べたものである。更に、「パルス幅」または「パルス持続時間」という語は、別途言及がない限り、半値全幅（FWHM）について述べたものである。また、Qスイッチ制御されたパルスは、例えば、実質的にガウス形の中心ローブと比較的遅い減衰の指数関数的後端部との混合に酷似しているこのがある標準のQスイッチ制御式システムにおいて得られるようなパルスの時間分布について包括的に言及したものである。これらの波形は、レーザー関係の文献中では「Qスイッチ制御式パルスエンベロープ」と正式呼称される。図1cはこのようなパルスを例示している。

【0007】

米国特許第5,208,437号（すなわち、第'437号特許）では、1ナノ秒より短いパルス幅仕様がメモリ修復応用例について指定されていた。「下位層に損傷を与えずにアルミニウム薄膜をレーザー切断する処理（Laser Cutting of Aluminum Thin Film with No Damage to Under Layers）」と題するCIRP年会報第28/1巻、1979年刊に開示された第'437号特許の共同発明者による初期の労作として、上述のような「ガウス」形状を有し得る比較的短いレーザーパルスを用いた試験的結果が挙げられる。これらの結果は、「『アルミニウムな

どから作成された』相互接続パターンの所望部分が切断される時には、相互パターンの下方に配置されている層に損傷を与えずに行える」ことを示していた。実質的に 10^6 W/cm^2 のエネルギー密度で実質的に1ナノ秒以下のパルス幅を得る仕様が、この装置について開示されていた。しかしながら、空間的にはビームは相互接続パターンに対応するように成形されていたにもかかわらず、時間パルス成形処理の方法に関しては何の開示もなかった。更に、超高速範囲の特定パルス幅で多層の高密度メモリ装置に実施した出願人の解析は、第1437号特許で採用された100ピコ秒から300ピコ秒で取り組まれたが、満足のゆくものではなかった。この制約を克服するには、目下のところ、容認できないレベルまでレーザー処理速度を低速化することになっても、多数のパルスを生成して各標的部位を処理するのに超高速レーザーシステムを必要とする。

10

超高速級に続いて、マイクロ加工作業についての試験結果が開示された。超高速パルスは約1フィート秒(10^{-15} 秒)から1ピコ秒(10^{-12} 秒)の持続時間を有しており、時間尺度を減じた場合は、数百ピコ秒から数百ナノ秒の範囲で観察されるのとは基本的に異なる原子および分子の状態の材料特性を活用している。

米国特許第5,656,186号と、「超短波レーザーパルスで精加工に取り組む(Ultrashort Laser Pulses Tackle Precision Machining)」と題するレーザー・フォーカス・ワールド(Laser Focus World)誌の1997年8月号の101頁から118頁の掲載論文において、数種類の波長における加工作業が解析されており、合焦ビームの回折制限されたスポット寸法よりも相当に短い加工特性寸法が披露されている。

【0008】

20

超高速パルス発生用のレーザーシステムは複雑さがシステムごとに異なり、それらの具体的な実施形態は米国特許第5,920,668号および第5,400,350号と、「超高速レーザーが実験室から逸出(Ultrafast Lasers Escape the Lab)」と題するフォトンクス・スペクトラ(Photonics Spectra)誌の1998年7月号の157頁から161頁に記載されている。これらの実施例は一般に、増幅の前にモードロックされた超高速パルスをパルス伸張させて、増幅器飽和とそれに続く極度に狭い幅への圧縮を回避する方法を含んでいる。この技術は、或る等級のマイクロ加工処理と、恐らくは、より精尺度の「ナノ加工処理」作業とについて有望であり、後者の恩恵は回折制限より低い加工処理により得られる。しかし、本件出願人は、現時点の実際の制約に付随して、金属接合部ブロー成形やこれに類似するマイクロ加工の応用例などの応用例についてはパルスごとに得られる出力では多数のパルスを得る要件として容認できない要件に行き着くことを看破した。

30

出願人は短波パルスの使用の理論的解釈について詳述したいと思い、その根拠が多岐にわたるので高速立上がり時間のパルスについては本明細書後段で示し、多数の理論と実験に基づく論文と書籍とを当該課題について著述してきた。諸原理は、実質的に異なる光特性と熱特性を有している材料により標的材料が包囲されている多数のレーザー処理応用例にまで及んでいるが、金属接合部の融除が1例として挙げられている。以下の引例1から引例3はその具体例である

1. ジョン・エフ・レディ(John F. Ready)著、「高出力レーザー放射の効果(Effects of High Power Laser Radiation)」、ニューヨークのアカデミック・プレス(Academic Press)から1971年刊行、115頁から116頁に掲載。

40

2. シドニー・エス・チャーシャン(Sidney S. Charschan)著、「レーザーによる材料処理のガイド(Guide for Material Processing by Laser)」、メリーランド州ボルティモアのザ・ポール・エム・ハロッド・カンパニー(The Paul M. Harrod Company)から1977年刊行、5頁から13頁に掲載。

3. ジョゼフ・バーンスタイン(Joseph Bernstein)、ジェイ・エイチ・リー(J.H. Lee)、ガン・ヤン(Gang Yang)、タリク・エー・ダーマス(Tariq A. Dahmas)共著、「レーザー金属切断エネルギー処理ウインドウの解析(Analysis of Laser Metal-Cut Energy Process Window)」、(刊行予定中)。

【0009】

金属反射率

50

レーザーパルス出力密度が増大すると、金属反射率は減少する（引例1）。金属の屈折率は材料中の自由電子の導電率に直接比例する。高強度レーザーによりもたらされるような高電界密度では、電子と格子の間の衝突時間が低減される。この衝突時間の短縮により導電率が減少し、よって、反射率も低下する。例えば、レーザー出力密度が 10^9 ワット/cm²まで増大すると、アルミニウムの反射率は92%から25%より低いレベルまで減少する。このため、反射に至るまでにおこるレーザーエネルギー損を回避するために、可能な限り短い時間のうちに作業片において高出力密度を達成することが有利である。

【0010】

熱拡散率

レーザーパルス期間に熱が移動する距離Dは、以下のように、レーザーパルスに比例している。

【数1】

$$D = \sqrt{kt}$$

この場合、kは材料の熱拡散率であり、tはレーザーパルスの長さである。

このため、短いレーザーパルスは溶融接合部より下方の基板への熱散逸を防止するとともに、接合部と連続している材料への横方向への熱伝達も防止していることが分かる。しかし、パルスは、接合部材料を隅々まで加熱するのに十分な長さがなければならない。

【0011】

熱応力と接合部の除去

レーザーエネルギーの吸収により、標的金属接合部が熱上昇し、膨張しようとする。しかし、接合部を包囲している酸化物は膨張する材料を含有している。このため、酸化物内に応力が蓄積される。或る点では、膨張する金属の圧力が酸化物の降伏点を超過しており、酸化物はひび割れ、金属接合部が細かい粒子の蒸気へと分解してゆく。金属接合部の主要なひび割れ点は最大応力点で発生し、最大応力点は、図1bに示されているように、接合部の上面と底面の両方の端縁部に位置している。

接合部を覆う酸化物が幾分か薄い場合には、酸化物のひび割れが接合部の頂面のみで発生し、酸化物と接合部が図1aに示されているように奇麗に除去されてしまう。しかし、酸化物が幾分か厚い場合には、接合部の底面ばかりか、頂面においてもひび割れが発生し、図1bに例示されているように、ひび割れは基板にまで伝播する。この状況は大変望ましくない。

Qスイッチ制御式レーザーシステムを修正して、多様な形状の短波パルスを生じさせることができる。高ピーク出力を生じさせる典型的な先行技術のレーザー、すなわち、短波パルスレーザーは標準Qスイッチ制御式レーザーである。これらのレーザーは、頃合のパルス立上がり時間を有している時間パルスを生じさせる。レーザービームの各部をスイッチにより遮断するポッケルスセルパルススライサを利用することにより、この時間形状を変えることが可能となる。本発明の出願人により発明され、同一譲受人に譲渡された米国特許第4,483,005号（すなわち、第'005号特許）では、レーザービームパルス幅に影響を及ぼす（すなわち、パルス幅を低減する）多様な方法が開示されている。第'005号特許に教示されているように、レーザーパルスは、中心ローブの外側のエネルギーを切捨てることにより「非ガウス形」成形ビームを生じさせるように幾分かは成形することができる。比較的広いQスイッチ制御式波形が狭い均一な形状に変形される必要がある場合には、パルスエネルギーの細かい何分の1かの部分だけが利用されることになることに留意すべきである。例えば、ガウス形パルスを部分的に切捨てることで、約65%分だけパルスエネルギーが低減される。

同様に、米国特許第4,114,018号（第'018号特許）では、時間パルスを成形して方形波パルスを生じさせることが開示されている。図7は比較的平坦なレーザー出力の時間間隔を例示している。第'018号の特許を受けた方法では、所望のパルスを発生させるために、ビーム強度の或る時間区分を除去することが必要である。

【0012】

先行技術に優る望ましい改良により、高度にエネルギーを封じ込めながら、パルス持続時間内に急速に減衰する後端部を伴って短波パルスを発生させる効率的な方法が提供される。これを達成するために、Qスイッチ制御式パルスエンベロープのパルス形状とは異なるパルス形状を生成するレーザー技術が好ましい。このようなパルスは高速立上がり時間、中心ローブにおける均一なエネルギー、急速な減衰を特徴とする。

標準Qスイッチ制御式のNd:YAG以外のレーザーにより生成されるような高速立上がり時間の高出力密度パルスなら、この仕事を最も良好に達成する。

上述のような利点は、従来のQスイッチ制御式固体ダイオード技術またはランプポンプ式YAG技術からは相当にかけ離れたレーザー技術を利用したシステムにおいて好ましい態様で実現される。

標準Qスイッチ制御式パルスとは異なる形状を有しているパルスを生成する、すなわち、高速立上がり時間、中心ローブにおける比較的均一かつより高エネルギー濃度、高速降下時間を特徴とするパルスを生成する方法およびシステムについて、先行技術に優る改良が望まれる。

【0013】

改良成果は金属接合部ブロー成形の応用例で得られると、本件出願人は判断した。例えば、上層絶縁体が存在している金属接合部処理については、非ガウス形の実質的に矩形のパルス形状が特に有利である。本件出願人の成果は、約1ナノ秒の高速立上がり時間、好ましくは約0.5ナノ秒の立上がり時間は上層の酸化物に熱衝撃を与え、これが接合部のブロー成形過程を容易にすることを示している。更に、より高い出力密度では、高速で立上がる短波パルスに伴って反射率が低減される。実質的に均一なパルス形状を示す約5ナノ秒パルス持続時間により、より大量のエネルギーが接合部に結合されて、接合部除去についてのエネルギー要件を低下させることができる。約2ナノ秒の急速な降下時間は、基板損傷の可能性を排除するのに重要となる。更に、時間内にほぼ方形波の出力密度パルスを生成する利点は、必要な時には出力密度が最高レベルにあり、必要でない時にはパルスが消失する点である。

短波高速立上がりパルスは、熱が接合部の下位部分まで拡散できるようになる前に、接合部の頂面が先に熔融して膨張することができるようにする。このため、接合部の頂面に応力が蓄積され、基板に達するひび割れを生じることなく、最上層のひび割れを促進する。

【0014】

【発明が解決すべき課題】

本発明の目的は小型の利得スイッチ制御式レーザーシステムを提供することであり、このシステムは、数ナノ秒の短い持続時間と急速な降下時間とを特徴とする1ナノ秒を下回る立上がり時間のパルスを生成する能力を有している。現在の技術レベルの高速パルスシステムは、低出力半導体シードレーザーを迅速かつ直接に変調して、抑制されたパルス形状を生成する利得スイッチ制御式技術を組み込んでおり、この場合のパルス形状は、高出力レーザーダイオードまたは高出力レーザーダイオード配列がポンプレーザーとして採用されているクラッドポンプ式光ファイバーシステムのようなレーザー増幅器で実質的に増幅される。かかるレーザーシステムは米国特許第5,694,408号およびPCT出願番号PCT/US98/42050号に記載されており、例えば、米国特許第5,400,350号に記載されているシステムの

ような或る超高速チャープ式パルス増幅システムの「構築用ブロック群」であった。本発明の一般的な目的は、先行技術のレーザー処理法およびシステムのなかでも、とりわけ、標的材料附近の領域の光特性および/または熱特性が実質的に異なっている先行技術のレーザー処理法およびシステムを向上させることである。本発明の一般的な目的は、マイクロ加工と、例えば、半導体メモリ上の接合部または他の相互接続部のレーザー融除、トリミング、ドリル加工、マーキング、マイクロ加工などのレーザー材料処理応用例とを実施するレーザーパルス成形能力を提供することである。所定の波形形状は、標準Qスイッチ制御式システムのレーザーとは異なる利得スイッチ制御式レーザーから発生される。

【0015】

本発明の目的は、16メガビットから256メガビットの半導体修復のような半導体処理を

10

20

30

40

50

目的とした改良案とその限界域を提供することであり、上述の改良案の結果、融除部位附近の導電性残留物や汚染物のせいで後ほど装置欠陥が生じる危険が無いまま、マイクロ構造の清浄な処理を行うことである。

本発明の目的は、数百ピコ秒程度までのパルス波形立上がり時間と、急速なパルス減衰を伴い、約10ナノ秒に満たないのが通例であるパルス持続時間とを供与することで、高出力密度で標的構造のレーザー処理を実施し、それにより、周囲領域の熱衝撃や熱拡散から生じる損傷を最小限に抑えることである。

本発明の目的は、半導体レーザー処理応用例において標的材料の周囲構造および下層構造への損傷を防止するにあたり、高出力の急速な立上がり時間のパルスをレーザー融除処理に好適な波長で利用して非常に短い時間のうちに作業片に高出力密度を達成することで、半導体材料処理応用例における処理ウインドウを改善するという方法で実施することである。

【0016】

本発明の目的は、半導体メモリ上の1箇所の金属接合部のような金属標的構造の反射率を低減させ、よって、レーザーエネルギーのより効率的な結合を実施するのに十分なだけ高速な立上がり時間と、十分な出力密度とを利用して、1種類のレーザー処理パルスだけで標的部位を処理することである。高速立上がりレーザーパルスは、融除期間中は比較的均一な出力密度で金属標的構造ごとの材料を効率良く加熱気化させるのに十分なパルス期間を有しているが、標的材料が気化させられた後の急速なパルス降下により、周囲構造と下層構造への損傷を回避している。

本発明の目的は、通常のパルス立上がり時間が数ナノ秒で、Qスイッチ制御式パルスエンベロープを代表とする標準Qスイッチ制御式レーザーを利用したシステムと比較した場合、半導体金属接合部のブロー成形応用例でより優れた性能を提供することである。レーザーパルスは、パルス持続時間が約2ナノ秒から10ナノ秒の範囲にあり、立上がり時間が約1ナノ秒で、好ましくは約0.4ナノ秒である、実質的に方形のパルス形状を供与するように生成される。更に、パルス減衰は、パルスがオフ状態に切り替わると急速に進行することで、所定のパルス持続時間後にはパルスエネルギーの非常に細かい何分の1かだけが残存するようにし、パルス「末尾」が急速に減衰して、下層基板または標的以外の材料に損傷を与える可能性を回避するのに十分なだけ低レベルにする。これらパルスの比較が図2に例示されている。

【0017】

本発明の目的は、半導体レーザー融除過程の処理ウインドウを拡張させて、互いに異なる光特性および熱特性を有している多種材料により包囲されている微細構造体の迅速かつ効率的な融除を実施することである。このような微細構造体は、通常は、隣接構造体間の幅と間隔が約1ミクロン以下であり、適切な深さに積載されている状態で配置されている。短波レーザーパルスの適用で標的材料を清浄に融除し、尚且つ、左右いずれの横方向への熱散逸による周囲材料への損傷や、標的材料の下方の下層基板への損傷が防止される。本発明の目的は、高エネルギー密度を有している短波パルスを適用することで、実質的に同質の光特性および熱特性を有している1種の材料を抑制可能な状態で加工することであり、この場合、パルスの持続時間は、流束量閾値がレーザーパルス幅の平方根に概ね比例している材料処理範囲では数ナノ秒である。

【0018】

本発明の上述の目的とそれ以外の目的を実行するにあたり、標的材料を包囲している材料の電気特性と物理特性の望ましくない変化を引き起こすこと無く、微細領域において特定寸法を有している標的材料を処理するための、エネルギー効率のよいレーザーベースの方法が提供される。この方法は、或るパルス反復率の単一波長レーザーを利用して、レーザーパルス列を発生させる工程を含んでおり、ここでは、パルス列の各パルスが所定の形状を有している。また、この方法は、パルスの所定の形状をそれほど変化させずにパルス列を光増幅させて、増幅されたパルス列を得るようにした工程を含んでいる。増幅パルスは各々が実質的に方形の時間出力密度分布と、急峻な立上がり時間と、パルス持続時間と

、パルス降下時間とを有している。この方法はまた、増幅パルス列の少なくとも一部を搬送し、標的材料上の1点に合焦させる工程を含んでおり、この場合、立上がり時間は、レーザーエネルギーを標的材料に効率的に結合するのに十分なだけ高速であり、パルス持続時間は標的材料を処理するのに十分な長さであり、パルス降下時間は、標的材料を包囲している材料に望ましくない変化が生じるのを防止するのに十分なだけ迅速である。

標的材料は導電線または導電接合部のような微細構造体を含んでいてもよいが、後者は余剰半導体メモリの共通回路素子である。導電線は金属線であってもよく、その場合、パルス持続時間は、金属線またはその特定部分を有効に加熱気化させるのに十分な長さである。

【0019】

10

標的材料は、16メガビットから256メガビットを有している半導体メモリのような半導体装置の一部であってもよい。

標的材料を包囲している材料の少なくとも一部は、半導体基板のような基板であってもよい。

標的材料は超小型電子装置の一部であってもよい。

実質的に方形の時間出力密度分布は、標的材料を実質的に完全に融除するのに十分である。

立上がり時間は1ナノ秒よりも短いのが好ましいが、0.5ナノ秒よりも短いのがより好ましい。

パルス持続時間は10ナノ秒よりも短いのが好ましいが、5ナノ秒よりも短いのがより好ましい。

20

また、降下時間は2ナノ秒よりも短いのが好ましい。

標的材料を処理するのに、通例、1個の増幅パルスで十分である。

標的材料は、増幅パルスに対して反射性を有しており、この場合、増幅パルスの出力密度は、増幅パルスに対する標的材料の反射率を低減するとともにレーザーエネルギーを標的材料に有効に結合させるのに十分なだけの高さである。

【0020】

各増幅パルスは、パルス持続時間全体で、比較的均一な出力密度分布を有しているのが好ましい。

各パルスは、パルス持続時間にわたって時間出力密度分布が10パーセントの範囲内まで均一であるのが好ましい。

30

標的材料を包囲している材料は、吸収特性、偏光感度特性、熱拡散特性などの光特性が、標的材料のこれらに対応する諸特性とは異なってもよい。

反復率は少なくとも1000パルス/秒であり、増幅パルスは各々が少なくとも0.1マイクロジュールから3マイクロジュールまでのエネルギーを有しているのが好ましい。

光増幅させる工程は少なくとも20dBの利得を供与するのが好ましい。

また、立上がり時間と降下時間の両方がパルス持続時間の2分の1よりも短く、増幅パルスごとのピーク出力が立上がり時間と降下時間の間で実質的に一定であるのが好ましい。

増幅パルスは各々が後端部を有しており、上記方法はまた、増幅パルスの後端部でレーザーエネルギーを減衰させて、増幅パルスの降下時間を低減させると同時に、パルスの出力を実質的に維持するようにした工程を更に含んでいるのが好ましい。

40

【0021】

更にまた、本発明の上述の目的および他の目的を実行するにあたり、標的材料を包囲している材料の電気特性または物理特性の望ましくない変化を引き起こさずに微細領域において特定寸法を有している標的材料を処理するための、エネルギー効率に優れたシステムが提供される。このシステムは、処理制御信号を発生させる制御装置と、処理制御信号に基づいて変調駆動波形を発生させる信号発生装置とを備えている。波形は1ナノ秒に満たない立上がり時間を有している。このシステムはまた、レーザーパルス列を或るパルス反復率で発生させる、利得スイッチ制御のパルス式単一波長シードレーザーを備えている。

50

駆動波形はレーザーをポンピングし、パルス列のパルスごとに所定の形状を有するようにしている。更に、このシステムは、パルスの所定形状を著しく変化させなくても、パルス列を光増幅させて増幅パルス列を得るようにした、レーザー増幅器を備えている。増幅パルスは各々が実質的に方形の時間出力密度分布と、急峻な立上がり時間と、パルス持続時間と、パルス降下時間とを有している。このシステムは、増幅パルス列の少なくとも一部を搬送し、標的材料上に合焦させるビーム搬送／合焦サブシステムを更に備えている。立上がり時間はレーザーエネルギーを標的材料に効率よく結合させるのに十分なだけ高速であり、パルス持続時間は標的材料を処理するのに十分な長さであり、降下時間は標的材料を包囲している材料に望ましくない変化が生じるのを防止するのに十分なだけ迅速である。

10

レーザー増幅器は、光ファイバーと、光ファイバーを励起するレーザーダイオードのような励起手段とを備えているのが好ましく、この場合、励起手段はシードレーザーとは性質を異にしている。

レーザーダイオード励起源はまた、レーザー処理が生じていない延長期間中に「遮断」状態に切替えることにより、利得スイッチ制御されて（パルス制御され、直接変調されて）ダイオードの耐用年数を増大させることができる。

【0022】

シードレーザーはレーザーダイオードを含んでいるのが好ましい。

上記システムは、増幅の後端部においてレーザーエネルギーを減衰させて増幅パルスの降下時間を低減すると同時に、パルスのエネルギー量を実質的に維持する減衰器を備えている。

20

パルス持続時間は、指定された標的材料寸法の関数として選択することができる。指定材料寸法はレーザー波長よりも短いこともある。好ましいレーザーは、約2 μmよりも短い波長を有している、高速半導体レーザーである。半導体レーザーダイオード技術とファイバー材における更なる材料進歩は、より長い赤外線波長における動作は元より、可視領域における動作にも備えている。

シードレーザーダイオードは、分散ブラッグ反射装置（DBR）、分散フィードバック（DFB）、または、外部空洞設計を利用した、マルチモードダイオードレーザーか、単一周波数（シングルモード）レーザーであってもよい。

スポット寸法は通例、約1 μmから4 μmの範囲の寸法を有している。

30

メモリの密度は少なくとも16メガビットから256メガビットであればよい。

半導体装置はマイクロマシン装置であってもよい。

パルス後端部の減衰状態のレーザーエネルギーは、パルス持続時間の1.5倍の時間範囲内で少なくとも10dB分だけ減衰されるのが好ましい。

【0023】

また更に、本発明の上述の目的および他の目的を実行するにあたり、金属接合部を包囲している少なくとも1つのパシベーション層の電気特性または物理特性の望ましくない変化を生じることなく、少なくとも1つのパシベーション層に指定寸法分が埋設された金属接合部を融除するための、エネルギー効率に優れたレーザーベースの方法が提供される。この方法は、或るパルス反復率を有している、単一波長レーザーを利用して、レーザーパルス列を発生させる工程を含んでいる。パルス列のパルスは各々が所定の形状を有している。この方法はまた、パルスの所定形状をそれほど変化させずにパルス列を光増幅させて、増幅パルス列を得る工程も含んでいる。増幅パルスは各々が時間軸に沿って実質的に方形の出力密度分布と、急峻な立上がり時間と、パルス持続時間と、降下時間とを有している。この方法は、増幅パルス列の少なくとも一部を搬送し、金属接合部上の一点に合焦させる工程を更に含んでいる。立上がり時間はレーザーエネルギーを金属接合部に効率良く結合させるのに十分に高速である。パルス持続時間は金属接合部を融除するのに十分な長さであり、降下時間は金属接合部を包囲している少なくとも1つのパシベーション層に望ましく変化が生じるのを防止するのに十分なだけ迅速である。

40

【0024】

50

また更に、本発明の上述の目的および他の目的を実行するにあたり、金属接合部を包囲している少なくとも1つのパシベーション層の電気特性または物理特性に望ましくない変化を生じることなく、少なくとも1つのパシベーション層に指定寸法分が埋設された金属接合部を融除するための、エネルギー効率に優れたシステムが提供される。このシステムは、処理制御信号を発生させる制御装置と、処理制御信号に基づいて変調された駆動波形を発生させる信号発生装置とを備えている。波形は1ナノ秒に満たない立上がり時間を有している。このシステムはまた、或るパルス反復率でレーザーパルスを発生させる、利得スイッチ制御のパルス式単一波長シードレーザーを備えている。駆動波形がレーザーをポンピングさせて、パルス列のパルスごとに所定の形状を有するようにしている。更に、このシステムは、パルスの所定形状をそれほど変化させずにパルス列を光増幅させて、増幅パルス列を得るようにしたレーザー増幅器を備えている。増幅パルスは各々が時間軸に沿って実質的に方形の出力密度分布と、急峻な立上がり時間と、パルス持続時間と、降下時間とを有している。このシステムは、増幅パルス列の少なくとも一部を搬送し、金属接合部上の一点に合焦させるビーム搬送合焦サブシステムを更に備えている。立上がり時間はレーザーエネルギーを金属接合部に効率よく結合させるのに十分なだけ高速である。パルス持続時間は金属接合部を融除するのに十分な長さであり、降下時間は金属接合部を包囲している少なくとも1つのパシベーション層に望ましくない変化が生じるのを防止するのに十分なだけ迅速である。

10

金属接合部は、それを覆う頂面パシベーション層と下に位置する底面パシベーション層とに埋設されていてもよい。パルス持続時間は頂面パシベーション層にひび割れを入れるには十分であるが、底面パシベーション層にはひび割れを入れない程度の長さである。

20

【0025】

本発明の上述の目的および他の目的を実行するにあたり、レーザー材料処理に好適な波長を有しているレーザーを利用して標的材料を融除すると同時に、材料の周囲に対する損傷を回避する方法が提供される。この方法は、レーザービームを変調させて、所定の利得スイッチ制御式パルスを生成する工程と、標的領域上にレーザービームを合焦させる工程とを含んでいる。所定の利得スイッチ制御式パルスの形状は、レーザーエネルギーを標的構造体に効率良く結合させるのに十分なだけ高速なレーザーパルスの立上がり時間を有しており、この時には、パルス持続時間は標的材料を有効に加熱気化させるのに十分な長さであり、パルス減衰時間は標的材料を包囲している構造体の損傷を回避するのに十分なだけ迅速である。

30

更に、本発明の上述の目的および他の目的を実行するにあたり、レーザー処理に好適な波長を有しているレーザーを利用して材料を融除すると同時に、周囲の材料に対する損傷を回避するためのシステムが提供される。このシステムは、レーザー源と、レーザー源を変調させて所定の利得スイッチ制御されたパルス形状を有するレーザーパルスを発生させる構成要素と、レーザービームを標的領域上に合焦させる光構成要素とを備えている。所定のパルス形状は、レーザーエネルギーを標的構造体に効率良く結合させるのに十分なだけ高速なレーザーパルスの光立上がり時間を有しており、この時、パルス持続時間は標的材料を効率よく加熱気化させるのに十分な長さであり、パルス減衰時間は標的材料を包囲している構造体の損傷を回避するのに十分なだけ迅速である。

40

【0026】

【課題を解決するための手段】

本発明の好ましい構成では、利得スイッチ制御されたパルス形状は、頂面が実質的に平坦で、立上がり時間が高速で降下時間が高速なパルスを含んでいる。「シード」レーザーダイオードは、直接変調されて所定のパルス形状を発生させる。光出力はファイバーレーザー増幅器を用いた増幅作用によりレーザー処理に十分な出力レベルまで増大される。この結果としてライバーレーザー増幅器出力端に生じる利得スイッチ制御されたパルスは標的領域上に合焦される。

本発明の構成では、「シード」ダイオードを直接変調して、所定の利得スイッチ制御されたパルスを生成し、ファイバーレーザー増幅器を用いて低歪み増幅を実施して材料処理に

50

十分な出力パルスレベルを供与するのが有利となる。

代替の構成では、直接変調されたシードダイオードのパルス時間出力分布を変調して、例えば、出力変調器の「平滑な」立上がり等の、ファイバー増幅器または他の構成要素の歪みまたは不均一性を補償している。この結果として生じるレーザー処理パルスは、標的領域に合焦されるが、所望の形状を有し、立上がり時間が高速で、パルス持続時間中は比較的平坦で、急速な減衰を伴うことになる。

【0027】

本発明の構成では、レーザーパルスの終端時に、レーザー処理システムの出力端に残存しているレーザーエネルギーを減衰させるために使用される「パルススライス」モジュールを設けることにより、処理が完了した後に、標的材料として指定されていない高感度の構造体が加熱されるのを防止してレーザー処理システムの性能を向上させることが有利である。「パルススライス」技術は修正されたパルスと標準Qスイッチ制御されたパルスのいずれの後端部を減衰するのにも有用である。これは図4aおよび図4bに例示されており、ここでは対数目盛が図4bの垂直軸に設けられている。

とりわけ金属接合部ブロー成形では、1kHz（1000パルス／秒）のパルス率で、1パルス中に少なくとも0.1マイクロジュールのレーザーパルスエネルギーを利用して、0.1マイクロジュールをファイバー増幅器の出力端で発射させて、レーザー処理作業を実施するのが好ましいが、この場合、光ファイバー増幅器の利得は少なくとも20dB（1000：1）である。

【0028】

本発明の構成では、レーザーパルスはパルス持続時間の約2分の1よりも短い立上がり時間と降下時間を有している状態に成形されており、この場合のピーク出力は立上がり時間と降下時間の間で概ね一定である。

本発明の構成では、一連の互いに密に間隔を設けた短波パルスを発生させることが可能であり、パルスは、互いに結合されると、図3aおよび図3bに例示されているような所望のパルス形状を生成する。

本発明を利用したシステムの構成では、材料処理速度を超過するパルス反復率でレーザーを作動させ、コンピュータ制御の光スイッチを利用して処理パルスを選択することも有利であるが、この時、コンピュータは、合焦レーザービームを位置決めするために使用されて材料処理を実施するビーム位置決めシステムに動作可能に接続されている。

【0029】

本発明の上述の目的および他の目的、特徴、利点は、添付の図面と関連して理解されれば、本発明を実施する最良のモードについての後段の詳細説明から容易に明白となる。

【0030】

【発明の実施の形態】

レーザー処理システムの構造

当業者なら正当に評価することができることであるが、以下の実施形態は、レーザー出力、エネルギー密度、スポット寸法、波長、パルス幅、偏光率、反復率などのパラメータを適切に調整すれば、マイクロ加工およびレーザー処理における幾つかの応用例に適用することができる。金属接合部ブロー成形への特殊な適用例を具体例として説明していく。

【0031】

図7の好ましい実施形態では、シードレーザー10とファイバー増幅器は、運動システム20と作業片に装着された安定した台に搭載されている。10分の3ミクロンより細かい精度でビームを位置決めすることは、接合部を除去する際には極めて重要である。標的および光学系の相対位置と相関関係付けるようにレーザーパルスをタイミング調整することは、高い処理速度を得るために必要な連続運動のために重要となる。

レーザー10はコンピュータ33および信号発生装置11により外部制御されており、そこで変調されたビームを、口径の数値が高い光学系を備えている合焦サブシステム12に伝播するが、このサブシステムは、コンピュータ33を介してスキャナ制御部により制御される検流計ミラーなどのビーム偏向器を更に備えていてもよい。システム制御コンピュ

ータ33はまた、システムと信号発生装置11のための位置決め機構すなわち運動システム20に動作可能に接続されて、パルス発生のタイミングを適切に調整する。レーザービームは厳密に制御されて、約1.5ミクロンから4ミクロンの範囲のスポット寸法でX、Y、Zの正しい位置に鮮明に合焦されたビームを生成しなければならない。このように、ビーム位置決め処理およびビーム合焦処理の当業者であれば、レーザーヘッドまたは標的物質の近回折、制限された性能、および、高精度運動制御を実施するために補正される光学系の重要性を認識するであろう。特殊なレーザー処理応用例の要件次第では、比較的狭い視野を光学系に設け、回折制限された合焦処理と高精度のX-Y方向運動段を実施して、ビームの位置決めを行うことが有利であるかもしれない。更に、並進段と組み合わせて高速偏向を実施するようにミラーの運動を多様に組み合わせることも実行できる。

10

【0032】

進退／反復テーブル34を利用してウエーハ22を適所に移動させ、ウエーハから取り出したメモリダイス24を処理することができる。ビーム走査の当業者ならば、ミラーベースのビーム偏光システムの利点を正当に評価するだろうが、上述のように、基板および／またはレーザーヘッドの移動用のX-Y方向並進段のような他の位置決め機構を代用とすることも、本発明を実施するうえで実行可能な代替案である。例えば、基板位置決め機構34は非常に厳密な（1ミクロンを十分に下回る）X、Y、Z方向の位置決め機構を有して、制限された移動範囲に亘って動作するようにしてもよい。位置決め機構20を用いて、レーザー、ファイバー増幅器、より粗な様式の合焦サブシステムレーザーから成る処理用光学系構成要素を並進させるようにしてもよい。好ましい位置決めシステムに関するこれ以上の詳細は、1998年9月8日に出願された「高速高精度位置決め装置（High Speed Precision Positioning Apparatus）」という名称の上述の係属中の米国特許出願に開示されている。

20

また別な音響光学減衰器またはポッケルスセルの様式のシステム光スイッチ13はレーザー空洞を越えて、レーザー出力ビーム内に位置決めされている。このスイッチは、コンピュータ33の制御下で、所望された場合と処理ビームが必要な場合を除いてはビームが合焦システムに達することがないようにするためと、所望の出力レベルまでレーザービームの出力を制御自在に低減するための、この両方の目的に役立つ。気化処置手順の間、システムと処理過程の作業パラメータ次第で、出力レベルは名目レーザー出力の10パーセント程度にしかない。気化処置手順より前にレーザー出力ビームが標的構造体と整列状態になる整列処理手順の間、出力レベルは名目レーザー出力の約0.1パーセントとなることもある。ポッケルスセルの遅延が相当に低いけれども、使用が容易であるので、音響光学装置が一般的には好ましい。

30

【0033】

動作については、ウエーハ22（または、標的もしくは基板）の位置はコンピュータ33により制御される。通例、相対運動はシリコンウエーハ22上のメモリ装置24上方では実質的に一定速度であるが、ウエーハの進退／反復運動が可能である。レーザー10は、運動システムを制御するタイミング信号に基づいたタイミング信号により制御される。レーザー10は通例、一定の反復率で作動し、システム光スイッチ13により位置決めシステムに同期される。

40

図7のシステムブロック図では、レーザービームはウエーハ22上に合焦されているのが図示されている。図9の拡大図では、レーザービームは、メモリ回路または装置24の接合部要素25の上に合焦されているのが分かる。

【0034】

微細な接合部構造体を処理するために、スポット寸法の要件はますます厳しくなりつつある。スポット寸法の要件は通例は、直径にして1.5ミクロンから4ミクロンであるが、この時、ピーク出力は、ガウス分布に良好に一致して、スポット中心に発生し、また、それより低い出力は端縁部に発生する。通例の約1.1倍かそれより良好なビーム品質すなわち「mの2乗積の因子」で回折制限に近づいた、優れたビーム品質が必要となる。この「倍化回折制限」の品質標準はレーザービーム解析の当業者には周知である。光クロストー

50

クや標的領域外の機構を意に反して照射することを回避するのには、低い副ローブも好ましい。

接合部25はスポット寸法よりも幾分小さすることにより、高精度位置決めと良好なスポット品質を義務付けている。接合部は、例えば、1ミクロン幅で約3分の1ミクロン厚さにすることもできる。本明細書に示された事例では、接合部は金属から作成されており、横方向の寸法（幅）と厚さはレーザー波長よりも小さい。

【0035】

好ましいレーザーシステム

好ましい実施形態では、図5のレーザーサブシステムは主発振器－出力増幅器（MOPA）構成を利用している。このシステムは、増幅器を線源として高出力で立上がり時間が短いパルス生成するレーザーパルス生成している。シードレーザーは短波パルスを高速立上がり時間で、しかも、非常に低いエネルギーレベルで生成する要となっている。このシステムは、材料処理を行うのに十分なエネルギーを生成するために、レーザー増幅器を必要とする。レーザー処理応用例に好適な出力波長を有している、ファイバーレーザー増幅器や高速赤外線レーザーダイオードが好ましい。このようなシステムを利用して、図5の下部に例示されているような好ましい形状と速度のレーザーパルス生成するレーザーが案出される。すなわち、高速な立上がり時間のパルスであるが、頂部が方形で、降下時間も高速なパルスである。このパルス形状を利用すると、金属反射率の低減、装置内へのエネルギー拡散の低減、下層酸化物には損傷を生じずに表層酸化物にひび割れを設けるとい

【0036】

MOPA構成は比較的新規で、パルス式のバージョンは最新技術であると見なされている。変調用駆動波形にตอบสนองしてから1ナノ秒に満たない立上がり時間のレーザーダイオードは、利得素子としてレーザーダイオードを備えているファイバーレーザーMOPA構成の黎明点である。レーザーダイオードは一般に多縦モードを有しており、そのサブシステムは単一モード動作に構成されるか、そうでなければ、出力端の集合構成要素で同調処理してもよく、或いは、代替例として、システムに統合型ファイバー格子を設けてもよい。

例えば、ニュー・フォーカス・インコーポレーティッド（New Focus Inc.）による製品文献に記載されているリットマン－メトカーフ格子構成を外部空洞構成内に置いた構成も実行可能である。図6bは外部空洞同調機能を備えている単一周波数レーザーの概略を例示しており、また、クラディング位置で励起用レーザーダイオードにより励起される光ファイバーを備えているのを示している。

【0037】

上記以外のダイオードレーザーの代替例としては、分散フィードバックレーザー（DFB）や分散ブラッグレーザー（DBL）があるが、これらは一体型格子と導波路構造体を有しており、事例によっては、外部制御部を備えていて、ユーザーが単独で利得、位相、および、格子フィルタを制御できるようにしている。図6aのDBL構成を見ると、カップラー50を備えている。これにより、柔軟なモード選択と同調能力が供与される。レーザー周波数は、格子のような集合構成要素および／または外部空洞のミラーを調節することにより多数の構成に関して動的に選択することが可能であり、或いは、代替例として、固定波長または固定モードが選択されてもよい。ダイオードの中心波長を選択することができる範囲は全体に印象的で、1μmより短いレベルから約1.3μmないし1.5μm或いはそれよりも長いレベルまで広がり、後者の波長は光ファイバー通信で用いられている波長である。

いずれの場合にせよ、本発明を達成するための要の要素は、材料処理のために選択されたレーザー波長にある場合でも、「シード」レーザーダイオードの立上がり時間とパルス形状である。また、本発明について一考すべき点として、光ファイバー増幅器がわずかな波長変化には殆ど反応しないスペクトル帯域、すなわち、増幅器が「フラット」な反応を示す領域のスペクトル帯域にシードレーザー波長を一致させて、優れたパルス対パルス出力が十分なパワーを有したままに維持するようにすべきである。イッテルビウムでドーピングされたファイバーについては、シリコンの1.1μm吸収端縁附近の適度に広い波長帯域内

とその附近では利得が高い。材料または一体型ファイバー構成要素を更に安威発すれば有効波長領域を拡大して、ファイバー発射スペクトルや、高速レーザー波長や、標的材料の諸特性に調和する一層の柔軟性を供与することができる。例えば、1997年8月刊行のフォトンクス・スペクトラ (Photonics Spectra) 誌の92頁で、 $1.1\mu\text{m}$ から $1.7\mu\text{m}$ の波長範囲にわたる先端記述のファイバーレーザー開発についての成果が報告されている。

【0038】

ラマンシフト器の動作は、短波Qスイッチ制御式システムを用いた特殊用途について、上述の第'759号特許に記載されていた。所望されれば、この装置をファイバーシステムの出力端に設置して、出力波長を所望の領域にシフトし、例えば、吸収コントラストなどを向上させることもできる。上述の第'759号特許に教示されているように、処理についてのパルス幅要件および小さいスポット寸法要件の重要性を認識すれば、金属接合部処理用の好ましいシステムの典型的動作は、例えば $1.08\mu\text{m}$ の波長については、約 $1.06\mu\text{m}$ かそれを超過する範囲に入ることになる。

シードレーザーの出力を増幅してレーザー材料処理にあたることになる。好ましい光ファイバーレーザー増幅器は約30 dBの利得を供与する。シードレーザー出力端がファイバーレーザーのコアに連結されるが、この場合、直接連結されているか、或いは、ファイバー搬送用にビームを分岐させる集合光学系を用いて連結される。これら技術は両方ともが、チャープパルス増幅を利用した超高速レーザー技術の当業者により定常的に実施されているが、好ましい実施形態のシステムは全体的に、かかる超高速システムよりも複雑さの程度が遥かに少ない。本発明のシステムでは、シードパルスは増幅され、パルス伸張やパルス圧縮用の光学系は全く必要とならない。増幅器システムで使用されるファイバーは、シードレーザーとは実質的に異なる980nm等といった波長を有しているダイオードレーザーでクラッドが励起され、これにより、集合光学系配置内の二色性ミラーを用いてシードビームと励起ビームの光絶縁を実現することができるようになる。経費、寸法、および、整列の容易さの観点から言えば、好ましい構成は、シードレーザーがファイバー増幅器に直接連結されている連結配置を利用する。ファイバーレーザーシステム設計の当業者には馴染みのある結合技術を利用して、励起レーザーは希土類イットルビウム (Yb) でドーピングされたファイバーのクラッド構造体に、例えば980nm波長の高出力ダイオードエネルギーを注入する。

【0039】

低歪みはファイバー増幅器の重要な特徴である。低歪みにより、出力パルス形状をシードレーザーパルス形状と実質的に一致させることができるようになり、或いは、パルス端縁を更に改良し、すなわち、均一な出力形状を更に向上させることも可能となる。光ファイバー利得媒体は図5の増幅器パルスを生成するが、このパルスは光学系に搬送されて、物体上で合焦される。

歪みが低いのであれば、多数のファイバー増幅器を縦続接続して、必要ならば、更なる利得を得るようにしてもよい。中間段の出力端に能動光スイッチまたは受動光絶縁器を設けて、自発的発射を抑制するようにすることが有利な場合もある。これらの技術は当業者には公知であり、例えば、米国特許第5,400,350号およびWO 98/92050号に開示されている。

【0040】

場合によっては、レーザーサブシステムにパルススライサが付加された状態で、パルスの「後端部」を低減することにより、パルス形状を更に向上させることが望ましいこともある。これは、ポッケルスセルのような電子光学装置の様式であってもよいが、低遅延音響光学変調器の様式であるのが好ましい。この技術は、処理パルスの短いが多数の「パルス期間」ごとに損傷の危険が発生する時はいつでも、パルス後端部でエネルギーを無視できる程度のレベルまで抑制することができる。例えば、エネルギーが所定パルス持続時間の1.5倍の範囲内で20 dB (100 : 1) 分だけ低減された場合は、どのような実際目的であれ、金属接合部ブロー成形の応用例においては基板損傷の危険が皆無となる。より具体的には、金属接合部ブロー成形の応用例で方形のパルス形状を得るのに8ナノ秒のパルス持続時間が選択されて、エネルギーが12ナノ秒後に20 dB低下された場合には、残りのエ

エネルギーは、Si基板に損傷を起こすことになるエネルギーよりも遥かに低く、この場合の損傷は、レーザーパルス^を付与してから実質的に約18ナノ秒後かそれより長い時間の後に生じる。好ましい動作モードでは、低遅延、高帯域幅パルススライス器が増幅器パルス持続時間の終端時点附近で活動状態にされ、中心ローブの歪みを最小限に抑えたままで、パルス^{後端部}に倍增効果をもたらす。増幅器歪みの効果はいずれも、また、変調器の「オン状態後の遅延」は、パルス持続時間中にシードダイオードレーザー波形の形状を変化させることにより、或る程度まで補償される。結果として生じた、合焦ビームの時間パルス波形は補償されており、所望の方形形状となる。

また、現在、ファイバーシステムは最適状態で、処理速度よりも幾分速い約20 kHzのパルス反復率で作動する。低遅延音響光学変調器のような出力光スイッチは、その駆動装置がコンピュータに作動可能に接続された状態で、処理用のパルスを選択する。このようにして、ファイバー増幅器の信頼性は高まり、よって、処理システムの信頼性が高まる。パルススライス器と出力光信号を組み合わせることで単体モジュールにすることが経済的観点から有利であることを、当業者ならば認識するだろう。

【0041】

代替のレーザーシステム

シードレーザーおよびファイバー増幅器の好ましいシステムの多数の利点を先に言及してきた。適切な駆動装置を備えているレーザーダイオードの電流変調は、ファイバーレーザー増幅器により増幅されても低歪みである、利得スイッチ制御された所望のパルス形状を直接生成することができる。この方法は、本発明を実施するのに最良かつ最も効率の良いアプローチであると思^われる。しかし、レーザーパルス発生およびレーザーパルス成形の当業者であれば、上記以外の効率の劣るアプローチを利用してもよいことを認識するだろう。例えば、米国特許第4,483,005号の教示を越えて進展するQスイッチシステムの修正例は、変調器の反応時間が十分に速い場合には多様な制御機能を用いてポッケルセルまたは光スイッチを駆動させることにより、比較的平坦なパルスを得るのに利用できる。パルス幅を変化させる現在の技術としては、Nd:YAGのQスイッチ制御式レーザー内の従来のガラスを、バルク、即ち、結晶の形式でGaAsと置換するといったように、修正された出力カプラーを使用することが挙げられる。GaAs出力カプラーを有しているNd:YAGレーザーの受動Qスイッチ動作では、Qスイッチ制御されたパルスの数ピコ秒から数ナノ秒の持続時間が報告されている（オプティカルエンジニアリング（Optical Engineering）1999年11月刊の38(11)号の1785頁から1788頁を参照）。

【0042】

レーザー処理工程および結果

金属接合部25は二酸化シリコン絶縁体層32によりシリコン基板30上に支持されているが、これは、例えば、厚さが0.3ミクロンから0.5ミクロンであってもよい。二酸化シリコンは接合部を覆って延在しており、窒化シリコンの別な絶縁層がSiO₂層上に存在していることも多い。接合部ブロー成形技術では、レーザービームは各接合部に衝突し、接合部を溶融点まで加熱する。加熱の最中は、上層のバシベーション層の閉込め効果により、金属は蒸発するのが防止されている。短波パルスの持続期間中は、レーザービームは漸進的に金属を加熱し、終には、金属が膨張しすぎて、絶縁体材料が破裂する。この時点で、溶融材は高圧下にあるため、瞬時に気化して、破裂穴を通してきれいに外へ噴出す。

上述の第'759特許で開示されているように、小さい金属接合部に関して非常に小さいスポット寸法を採用した場合、標的に当たるビームの部分からの伝達作用により、熱は本質的に指数関数的な勾配で広がるように思える。非常に高いピークビーム出力を採用したために、接合部の蒸発に必要なだけ十分なエネルギーが8ナノ秒のパルスで搬送される（実際にはもっと短い時間が好ましいが）ようにすることで、熱伝達の伝達成分は実質的に金属接合部と、非常に薄いにも関わらず、その下の酸化物質層に閉じ込められ、熱伝達が原因であるシリコンの温度上昇とシリコンへのビーム吸収が原因である温度上昇とが、容認できないシリコン損傷が発生する温度閾値より低いレベルで累積的に維持される。

【0043】

更に、上述の第'759号特許は、接合部とそれに隣接する構造体の熱伝達特性に関連する幾つかの重要な局面を教示している。例えば3ナノ秒から10ナノ秒の狭いパルス幅は、標的材料の厚さで決まるのであるが、代表的寸法部については、熱伝達とSi基板へのその後の損傷を回避するのが好ましいことを、熱モデルが予測している。しかし、接合部に結合する他の構造体も、以下の実験結果が示すように、レーザー処理結果の質に影響を及ぼすことがあることを認識することは決定的に重要である。

利得スイッチ制御された方形のパルス形状の利点は、コンピュータシミュレーションに基づく実験結果と、同シミュレーションによる実験結果の両方で検証済みであった（有限要素解析）。接合部ブロー成形のために利用されるレーザーについての仕様は以下のとおりであった。

10

レーザー波長	1.083ミクロン
最大レーザーエネルギー	10マイクロジュール
パルス幅	7ナノ秒（FWHM、方形パルス）
パルス反復率	10 kHz（70 kHzのレーザー速度）
空間プロファイル	ガウス形、TEM-00、
$M^2=1.02$ （倍化回折制限）	
偏光	無偏光
パルス立上がり時間	0.5ナノ秒

選択したレーザーは、980nmポンプダイオードと7ミクロ径の単一モードファイバーを利用したMOPA構成におけるイッテルビウムのクラッドポンプ式ファイバーレーザーであった。

20

【0044】

標準Qスイッチ制御式レーザーシステムと比較した場合、ここ何世代かのメモリ装置について先に指定されたレーザーを用いて実施した実験結果は卓越した性能を示した。実験結果から、MOPAレーザーの短波高速立上がりパルスが優れた性能の原因であったという結論に至った。先に開示されているように、根拠には3つの面がある。

1. 1.083波長は基板損傷を回避するのに十分なだけの長さであり、1.047 μm の波長と比べると、1.083 μm で約10倍少ない吸収率が生じるからである。
2. 高速立上がりパルスは、接合部除去を容易にする上位の酸化物層に熱衝撃を与えるからである。
3. 高速立上がりパルスの高出力密度は接合部反射率を低減し、これが効率よいエネルギー結合を可能にするからである。

30

これらの特徴はQスイッチ制御式システムを用いた場合に観察される相互作用からは相当な離脱をもたらしている。更に、コンピュータ有限要素モデルを利用して、多様な材料の厚さと接合部寸法について高速立上がりパルスの効果のシミュレーションを行った。その多数の結果から、互いに無関係に確認されたこととして、ほぼ方形の分布を示しながら急峻な立上がり時間のパルスの利用の結果として、接合部ブロー成形は向上が見られた。引例3の著者であるバーンシュタインにより作成されたコンピュータモデルの結果が図11aおよび図11bに例示されている。下記の表Aおよび表Bは、それぞれに、図11aおよび図11bのグラフと関与している。

40

【0045】

【表1】

表A

0.7 μ Jにおけるモデル1	方形パルス	遅い立ち上がりパルス
第1のひび割れ	1.88ナノ秒で929K	2.40ナノ秒で978K
第2のひび割れ	2.93ナノ秒で1180K	3.45ナノ秒で1380K
第3のひび割れ	2.05ナノ秒で1400K	なし
第4のひび割れ	4.73ナノ秒で1520K	なし

10

Al 厚さ：0.8 μ m Al 幅：0.8 μ m
SiO₂：0.1 μ m Si₃N₄：0.4 μ m
レーザーエネルギー：0.7 μ J

【表2】

表B

0.7 μ Jにおけるモデル2	方形パルス	遅い立ち上がりパルス
第1のひび割れ	2.03ナノ秒で974K	2.55ナノ秒で1050K
第2のひび割れ	なし	なし
第3のひび割れ	なし	なし
第4のひび割れ	なし	なし

20

Al 厚さ：0.8 μ m Al 幅：0.8 μ m
SiO₂：0.6 μ m Si₃N₄：0.6 μ m
レーザーエネルギー：0.7 μ J

【0046】

応力と温度の来歴は、立上がり時間が1ナノ秒に満たない高速立上がりパルスの重要性を確証をもって示している。相当量のパルスエネルギーが存在している場合には、融除処理完了してから数ナノ秒後、例えば15ナノ秒後に、Siが損傷を受けることがある。パルスが高速消滅する場合の高速降下時間も重要である。

30

【0047】

本発明によれば、波長を適切に選択することと、パルス持続時間を制限することの、両方の手段により、対応する方形のパルスが高速減衰して生じると同時に、シリコン基板は比較的低温に維持される。この具体例におけるレーザー波長は、シリコンの室温吸収率の上下変動端縁よりもわずかに短い（約1.1 μ m）。本明細書で報告された結果は基板損傷を示してはいないが、所望されれば、向上された限界域が利用できるようになることに留意すべきである。例えば、ラマンシフト器を利用して、吸収率端縁を超えて出力波長をシフトすることができた。代替例として、別なレーザーダイオードの波長がMOPA構成用に潜在的に商業的に利用できるようになるかもしれない。このような波長選択とシフト技術を別なレーザー処理応用例とマイクロ加工応用例で利用することができるのも有利である。いずれにせよ、このように加熱処理を制約することにより、シリコンが吸収率端縁を赤外線領域にシフトせず、シリコン損傷が発生し得る熱暴走状態に入らないことを確実にすることができる。

40

【0048】

金属接合部を綺麗にブロー成形するための高速パルス発生用のMOPA構成の特殊な実施形態はパルス成形の一例であると解釈され、制限するのではなく、むしろ、例示するために提示されている。高速レーザーの方向変調により、パルス形状について優れた1ナノ秒未満

50

高精度制御が維持され、出力パルスの形状を補正する高速補償の可能性を含め、有利であることが分かった。マイクロ加工、マーキング、スクライビングなどの別な応用例も高精度高速パルス制御の恩恵を受けることができた。例えば、シードダイオードは、表面上または表面内に特殊機構を設けたり、そこから除去したりするために、同様に、「鋸歯状」波形または別なQスイッチ制御されていない波形で容易に変調することができた。同様に、レーザーダイオードの高速反応のおかげで、一連の可変幅の短波パルスを連続して発生させることが可能となる。レーザー処理の当業者であれば、本明細書中のレーザーシステムの広範な応用例を認識するだろう。本発明の範囲は前掲の特許請求の範囲により示されており、それ以外の限定を受けるべきではない。

【図面の簡単な説明】

10

【図1】 図1 aは気化金属の膨張により半導体のみからなる頂面表層に応力ひび割れが生じているのを概略的に例示した図であり、図1 bは気化金属の膨張により半導体の頂面層と底面層に応力ひび割れが生じているのを概略的に例示した図であり、図1 cは「Qスイッチ制御式パルスエンベロップ」と呼ばれる、ガウス形状、または、ガウス形と指数関数的末尾との混合に酷似している典型的な先行技術のレーザーパルスを例示した図である。

【図2】 同一エネルギー総量のQスイッチ制御式と比較した場合の、金属接合部を処理する本発明の好ましいパルス形状を例示している図である。

【図3】 図3 aおよび図3 bは時間内に互いに密に間隔を設けた2つの短波パルスを結合させて修正パルスを生じる方法を例示した図である。

20

【図4】 図4 aおよび図4 bは一般的なパルス形状のパルスエネルギー封入を改善するための「パルススライス」の結果を例示した図である。

【図5】 レーザー材料処理の好ましいレーザーシステムを例示した一般的ブロック図である。

【図6】 図6 aは半導体シードレーザーとして分散ブラッグレーザーを備えている一種のMOPAレーザーシステムが、一元モードレーザーと好ましいパルス形状を生成する光ファイバー増幅器とから構成されているのを例示した図であり、図6 bは外部空洞同調機能を有している単一周波数のレーザーと光ファイバー増幅器とを例示した概略図である。

【図7】 好ましい減衰器と光シフト器を備えている、本発明の別なレーザーシステムの概略ブロック図である。

30

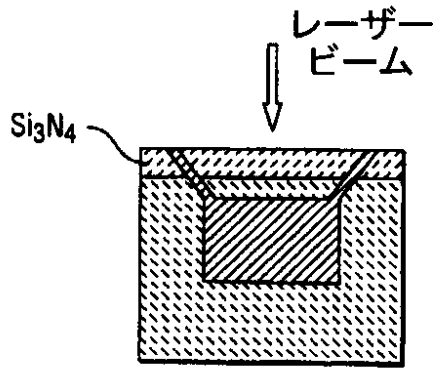
【図8】 二酸化シリコン層の厚さの関数として、二酸化シリコン層と図9のシリコン基板の間の界面の温度を例示したグラフである。

【図9】 基板上のメモリの接合部を例示した斜視図である。

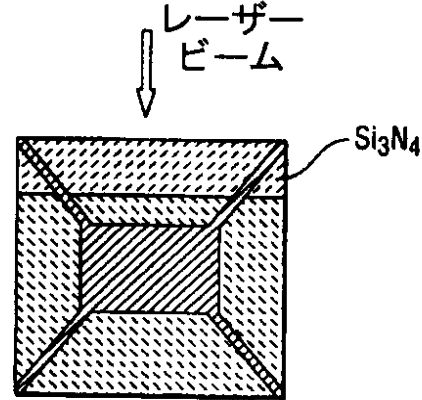
【図10】 ガウスレーザービームが金属接合部を含む焦点面上の小さい点へと合焦されているのを例示し、回折が制限されたビーム中央と比較させて接合部の微小寸法を強調した図である。

【図11】 図11 aおよび図11 bは、コンピュータ有限要素解析の結果を示しており、応力と温度の経時的来歴が金属接合部の処理で使用されるQスイッチ制御されたパルスと方形パルスについてグラフ上にプロットされたグラフである。

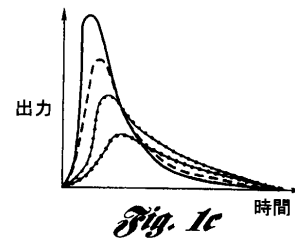
【図 1 a】

*Fig. 1a*

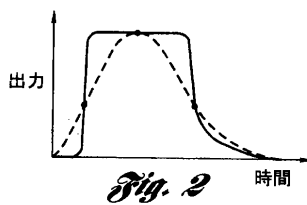
【図 1 b】

*Fig. 1b*

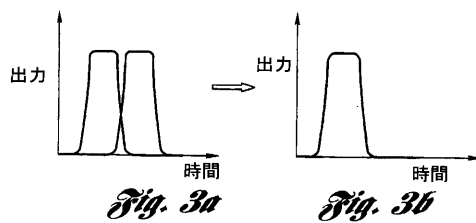
【図 1 c】

*Fig. 1c*

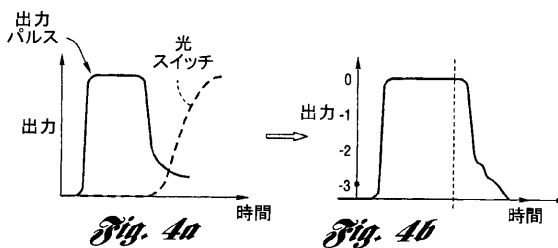
【図 2】

*Fig. 2*

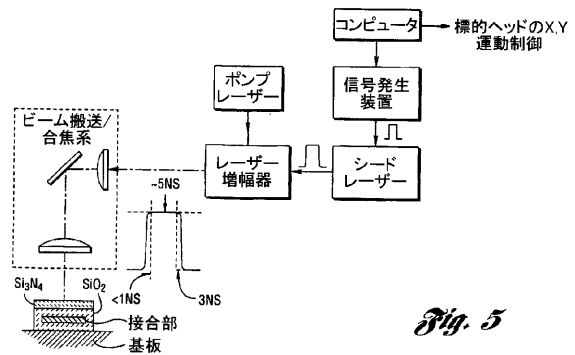
【図 3】

*Fig. 3a**Fig. 3b*

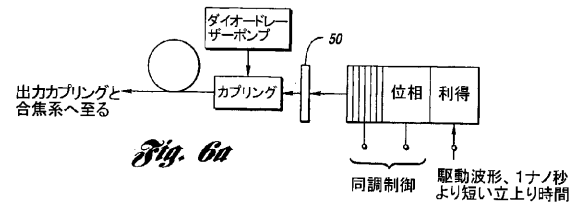
【図 4】

*Fig. 4a**Fig. 4b*

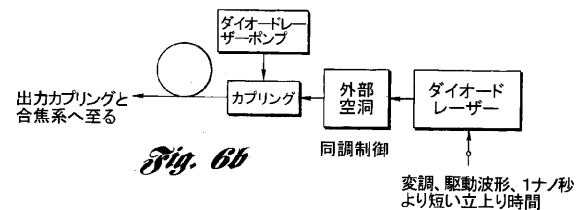
【図 5】

*Fig. 5*

【図 6 a】

*Fig. 6a*

【図 6 b】

*Fig. 6b*

【図 7】

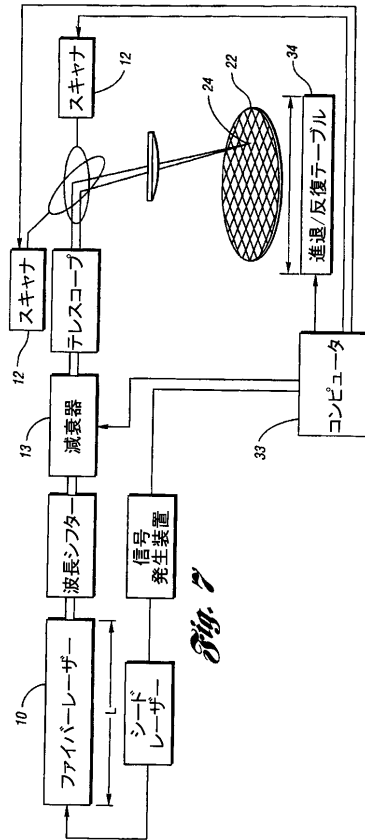


Fig. 7

【図 8】

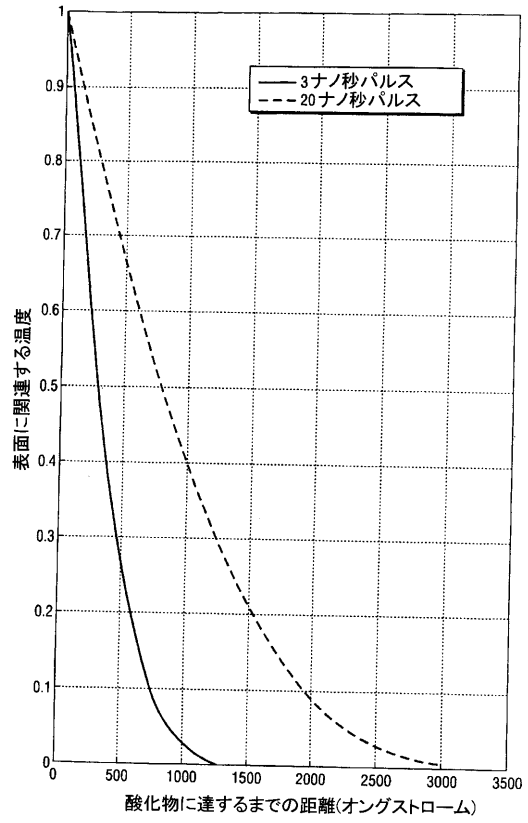


Fig. 8

【図 9】

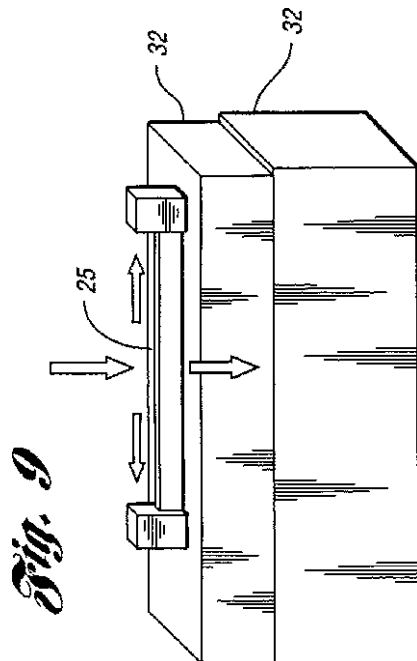


Fig. 9

【図 10】

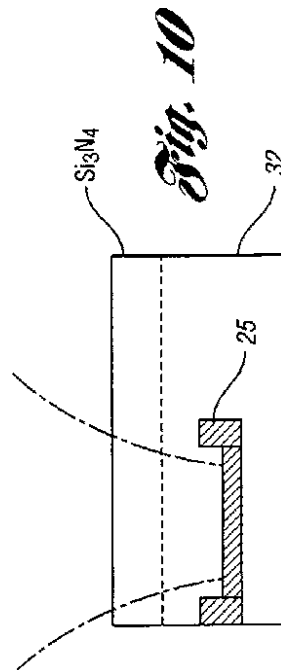


Fig. 10

【図 1 1 a】

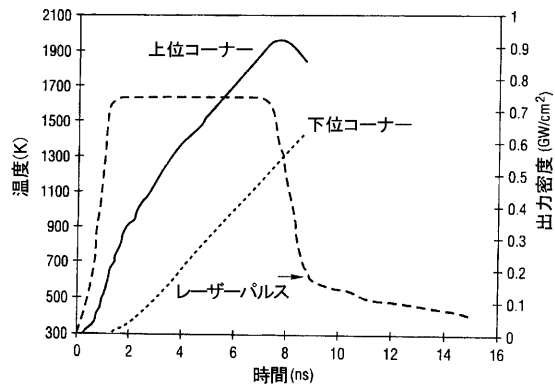


Fig. 11a

【図 1 1 b】

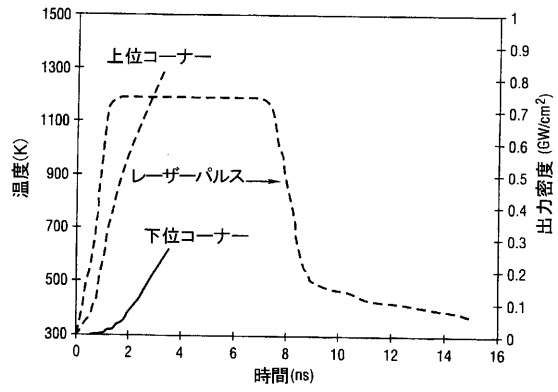


Fig. 11b

フロントページの続き

- (74)代理人 100096194
弁理士 竹内 英人
- (74)代理人 100074228
弁理士 今城 俊夫
- (74)代理人 100084009
弁理士 小川 信夫
- (74)代理人 100082821
弁理士 村社 厚夫
- (74)代理人 100086771
弁理士 西島 孝喜
- (74)代理人 100084663
弁理士 箱田 篤
- (72)発明者 スマート ドナルド ヴィ
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 02110 ボストン ルイス ワーフ 524

審査官 青木 正博

- (56)参考文献 特開平11-197863 (JP, A)
特開平07-183606 (JP, A)
特開平06-114582 (JP, A)
国際公開第99/021250 (WO, A1)
特開平07-288353 (JP, A)
特開平11-207479 (JP, A)
特開平09-183128 (JP, A)
特開平11-254171 (JP, A)
特開平08-057678 (JP, A)
特開平08-155506 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
B23K 26/00-26/42
H01L 21/302
H01S 3/00