パルスグリーンレーザーアニール用均一線状ビーム照射光学系の開発

岡本 達樹, 森川 和敏, 園 淳弘, 佐藤 行雄[†], 西前 順一

三菱電機(株)先端技術総合研究所(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

Development of Line-shaped Optical System for Pulsed Green Laser Annealing System for Manufacturing of Low-Temperature Poly-Si TFT

Tatsuki OKAMOTO, Kazutoshi MORIKAWA, Atsuhiko SONO, Yukio SATO,[†] and Junichi NISHIMAE

Mitsubishi Electric Corporation Advanced Technology R & D Center, 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661

(Received July 14, 2005)

We have developed a new optical system that transforms the circle profile beam generated with near Gaussian intensity distribution by a pulsed green laser (second harmonics of a Q-switched Nd:YAG laser) into a line-profile beam. This transformed beam has uniform distribution to within 5 % in the longitudinal direction, and is about 100 mm long and 40 μm wide. In the width direction, the laser beam is focused to the limited M^2 value. For homogenization in the longitudinal direction, we employ a one dimensionnal waveguide plate type homogenizer. The laser beam is divided by waveguide plates, and the divided beams are overlapped on the surface of the works. We successfully reduced interference fringes by increasing the fixed optical pass difference beyond the inherent time and coherent length for every divided pair of adjacent beams under a controlled space coherent length.

Key Words: Nd:YAG laser, Second harmonics, Polycrystalline silicon, Laser annealing, Line-shaped beam, Interference fringes

1. はじめに

高性能な液晶ディスプレイ(LCD), 有機ELディスプレイ(OLED)を作成するために低温多結晶シリコン(LTPS)薄膜トランジスタ(TFT)は必要である。TFTの製作のためにアモルファスシリコン(a-Si)薄膜を多結晶シリコン(poly-Si)薄膜に結晶させるために, 生産ラインでは, 一般にレーザーアニール技術が使われている。現在レーザーアニールでは, 紫外線の波長領域で発振するエキシマレーザーで, 308 nmの波長で発振するXeClレーザーが光源として一般的に使われている^{1,2)}。しかしながらアニール特性としてレーザー照射エネルギーに対する移動度の変化が大きく, わずかなレーザーエネルギーの変動に対して移動度が大きく変化するということが問題となっている。例えば, T.Ogawaら²⁾は, エキシマレーザーアニールの場合, 照射エネルギーが5%変動すると移動度が90%に低下すると報告している。この結果, 一定の移動度を得るために定期的な照射エネルギーの調節が必要になるとともに, 生産工程において歩留まりが上らないという大きな問題が生じている。また, エキシマレーザーは, 紫外線レーザーであり, 高電圧印加によるパルス発振を行うガスレーザーである。紫外線レーザーであることか

ら, レーザー窓の曇りに対する交換保守, レーザーガス交換の保守, 電極劣化によるレーザー本体の入れ替え等, 大きな保守時間, 保守コストが必要になり, TFTを量産するうえでの大きな問題となっている。

これらの問題を解決するために, エキシマレーザーに代わるレーザーとして注目されるのは, 半導体レーザー励起のNd:YAGレーザーの第2高調波により得られるパルスグリーンレーザー光(波長532 nm)を光源とするアニール装置³⁾である。パルスグリーンレーザーを使うと一定の照射エネルギーに対しエキシマレーザーに比べ広いプロセスマージンが得られる。これは, 紫外光であるエキシマレーザー光が, a-Si薄膜の表面のみで吸収され, 冷却時にガラス基板側に残されたシリコンの微結晶を核として結晶成長するので, 照射エネルギーの調節により溶融量を調節する必要があるのに対し, パルスグリーンレーザー光は, a-Si薄膜を透過するためシリコン膜全体が溶融し, 溶融したシリコンと未溶融のシリコンの境界から結晶成長するので, 照射エネルギーによる溶融量の調節が不要なためである。さらに, パルスグリーンレーザーは固体をレーザー媒質としガスレーザーではないため, 日常のガス交換は必要としない。また, 可視光を光源とするため, 紫外線のように有機ガスを分解してレーザー光取り

[†]現在の所属: 三菱電機(株)名古屋製作所(〒461-8670 愛知県名古屋市東区矢田南5-1-14)

[†]Present address: Mitsubishi Electric Corporation Nagoya works, 5-1-14 Yataminami, Higashi-ku, Nagoya, Aichi 461-8670

出し窓に薄膜が堆積することなく、レーザー窓に対するクリーニング等の日常保守も必要としない。さらにレーザー本体の入れ替えといった大掛かりな保守を必要とせず、結果的に保守に必要な維持費用が低減できる利点がある⁴⁾。エキシマレーザーで用いられている線状ビーム光学系は、2次元のホモジナイザにより、ビーム強度分布を均一化している。パルスグリーンレーザーは、エキシマレーザーに比べビーム品質が良いため、線状ビームの幅方向について、ホモジナイザで均一化することなく、レーザービームの M^2 値で決まる限界まで集光することにより、薄膜上での光強度を高めることができる。一方、パルスグリーンレーザーは、エキシマレーザーに比べ干渉性が高いため、干渉縞の発生により、長手方向の強度分布が乱される。パルスグリーンレーザーアニールは、エキシマレーザーアニールに比べプロセスマージンが広く、移動度が90%に低下する照射エネルギー変動は12%²⁾であるが、干渉縞が発生するとそれ以上の強度分布が発生してしまい、均一な結晶を得るのが困難であった。そこで、本報告では、パルスグリーンレーザー発振器から出力されるガウス強度分布を持つ円形のビームを均一な強度分布を持つ線状ビームにするための新しい光学系について述べる。

2. パルスグリーンレーザーアニールシステム

Fig. 1にパルスグリーンレーザーアニールシステムの概略構成図を示す。パルスグリーンレーザー(波長:532 nm)、ビーム成型光学系、X-Yステージで構成される。ビーム成型光学系では、パルスグリーンレーザーから放出されたガウス分布の円形ビームを線状ビームに変換する。ビーム成型光学系は、レンズの焦点距離等、光学パラメータの変更で、色々な線状ビームサイズに対応する。

Table 1に光学系の仕様を示す。本光学系は最大100 mm $\times$ 40 μ mの線状ビームを成形でき、YAG 2 ω レーザー発振器出力が50 mJ/pulseのとき、最大800 mJ/cm²以上のエネルギー密度で照射することができる。

Fig. 2にパルスグリーンレーザーアニール光学系の全体

Fig. 1 Schematic diagram of pulsed green laser annealing.

Table 1 Specifications of pulsed green laser annealing line-profile beam.

line-profile beam parameter		Specifications	
Beam size	Width (a)	40 $\pm$ 10 μ m	FWHM
	Longitudinal direction (b)	= 100 mm	FWHM
Longitudinal direction beam uniformity		= $\pm$ 5 %	10 % - 90 %

Fig. 2 Optical system for pulsed green laser.

ブロック図を示す。ここで、光軸を z 方向とし、ガラス基板上の薄膜に照射する線状ビームの幅方向を x 方向、長手方向を y 方向と定義する。

光学系は、レーザービーム導入光学系、ビーム成型光学系(ビーム強度均一化光学系(y 方向)、ビーム集光照射光学系(x 方向))に大きく分かれる。ビーム導入光学系は、レーザー発振器からのレーザービームの光軸位置、角度を調整し、可変アッテネータによりレーザーの照射パワーを調節する。アニール光学系全ての光学素子の損失を含めて、レーザー発振器出力の6%~65%の範囲で調節可能である。さらに、ビーム成型光学系の x 方向集光光学系により所望の集光ビーム幅を得るため、レーザービームの M^2 値にあわせて、ビーム成型光学系に入射するレーザービームのビーム径を調節する。

ビーム成型光学系は、ビーム集光照射光学系により、線状照射ビーム x 方向に対し、レーザー光の M^2 値で規定される限界までレーザービームを集光する。一方、ビーム強度均一化光学系(y 方向)により、線状照射ビーム y 方向に対し、導波路型ホモジナイザによりビーム強度分布を均一化し、線状の照射ビームパターンを成型するための光学系である。次章でビーム成型光学系の詳細について述べる。

3. ビーム成型光学系

3.1 ビーム集光照射光学系(x 方向)

Fig. 3にビーム集光照射光学系の構成を示す。レーザービーム導入光学系により成型されたレーザービームは、ビーム拡大レンズにより幅が拡大され、 x コリメートレンズにより平行光にされ、折り返しミラーで反射された

Fig. 3 Arrangement of beam focusing optical system (x direction).

後、集光レンズでガラス基板上に集光される。ここで、レーザービームは導波路構造のホモジナイザを通過するが、ホモジナイザは1次元構成であるので、y方向にのみ作用する。x方向に関しては作用しないため、(1)式で示すように、x集光レンズの焦点距離、x集光レンズに入射するレーザービームの幅とレーザー光の M^2 値で規定される幅まで集光できる。

$$d_0 = M^2 \frac{4\lambda}{\pi d} f \quad (1)$$

d_0 : 集光幅($1/e^2$ 全幅) M^2 : M^2 値 λ : 波長

d : 集光レンズ入射ビーム幅($1/e^2$ 全幅) f : 集光レンズ焦点距離

例えば、 $M^2 = 20$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, $d = 80 \text{ mm}$ ($1/e^2$ 直径), $f = 300 \text{ mm}$ とすると、

$$d_0 = 51 [\mu\text{m}] (1/e^2 \text{ full width}) \quad (2)$$

となり、FWHM(半値全幅)は、

$$d_n = \ln(2) \times d_0 [\mu\text{m}] (\text{FWHM}) \quad (3)$$

となる。

実際には、x集光レンズの幾何学的な収差があり、集光幅は、約 $40 \mu\text{m}$ (FWHM)になる。すなわち、集光幅は、レーザー発振器のビーム品質によって決まり、 $M^2 = 20$ 以下のレーザービームであれば、約 $40 \mu\text{m}$ 幅 (FWHM)まで集光することができる。

なお、(1)式からわかるように、集光前のレーザービーム幅を変更することにより、レーザー発振器の変更等に伴う M^2 値の変化に対応できる。

3.2 ビーム強度均一化光学系(y方向)

ビーム強度分布の均一化は、1次元の導波路型のホモジナイザによりレーザービームを断面方向で分割し、分割されたレーザービームを転写レンズによりガラス基板上の薄膜上に重ね合わせることに由り行う。Fig. 4にビーム強度分布均一化光学系の構成を示す。レーザービーム導入光学系で成型されたレーザービームは、ビーム拡大レンズとyコリメートレンズによりビーム幅が拡大され、y集光レンズにより導波路型ホモジナイザに絞こまれながら入射される。ここで、y集光レンズの焦点距離およびビーム幅は、導波路型ホモジナイザで、ビーム強度分布に必要なNAになるよう設定する。導波路型ホモジナイザ

Fig. 4 Arrangement of an intensity distribution shaping optical system (y direction).

では、およそ7~8個の短冊状のビームに分割される。導波路で分割されたレーザービームは、導波路出口で重なり、均一な強度分布になるが、導波路を出たあと別々の方向に広がっていく。それらのレーザービームを転写レンズでまとめ、折り返しミラーを経てガラス基板上に導波路出口の像を拡大転写することにより、ガラス基板上で均一な強度分布を得ることができる。本光学系では、20倍の拡大転写が可能で、5 mm幅の導波路を用いるとガラス基板上で100 mm (FHHM)程度の長さの線状ビームが得られる。

4. 干渉による強度分布変化と干渉抑制方法

4.1 導波路型ホモジナイザによる強度分布均一化時の干渉縞の発生

Fig. 5にレーザービームが導波路入射面に対して垂直に入射する場合の導波路によるビームの分割の様子を示す。

例えば、導波路で、入射ビームが7分割される場合を考える。導波路で分割される前の入射ビームを導波路内での反射回数別にA~Gの成分に分ける。垂直入射導波路では、入射ビームの外側であるA, Gが導波路の反射面に対して大きな角度を持って入射するため、導波路内での反射回数が多い。また、入射ビームの中心部であるDは、導波路の反射面で反射されることなく、導波路から反射される。導波路から出射されるビームは、反射されない成分Dを中心として、奇数回反射される成分A, C, E, Gが入射ビームと同じ方向に並び、偶数回反射される成分B, Fが入射ビームと反転し、逆方向に奇数回反射ビームの間に並ぶ。すなわち、導波路の出射面では、互いに隣接する分割ビームが折り返されて重畳される。いま、入射ビームの空間的な干渉距離が、導波路での分割幅より短い場合でも、レーザービームの分割前に互いに隣接する成分は、その境界が、導波路の出射面での端部で一致する。従って、このような折り返した分割ビームを、y転写レンズとx集光レンズを介して、ガラス基板上に重ね合わせて投影すると、照射面上で分割ビームが干渉し、縞状の強度分布が形成される。

本光学系では、導波路から放出されたビームが、y転写レンズの焦点位置で、反射回数の異なるビームが空間的に分離する。Fig. 6は、導波路で分割されたビームの2成分のみを切り出し、照射ビームの長手方向の強度分布を測定した結果である。(a)が、隣接する分割ビームであるCとDを重ね合わせた場合、(b)は、隣接していない分割

Fig. 5 Beam homogenization in perpendicular incidence waveguide plate.

Fig. 6 Interference fringes produced by pair of adjacent beams compared with that of nonadjacent beams.

ビーム同士、ここでは、CとEを重ね合わせた場合である。(a)では、干渉により干渉縞が発生し、強度分布が大きく変化している。特に、分割前に距離近かった端部で、その影響は顕著である。また、干渉縞の振幅は、照射ビームの中心に向かって減衰する。この減衰が、入射レーザービームの空間的可干渉距離に関係する。一方、(b)では、干渉縞が発生しておらず、入射レーザービームの空間的可干渉距離以上離れていることがわかる。このように、照射ビームに干渉縞が発生するため、長手方向に均一な強度分布が得られず、均一な粒径の結晶が得られない。

4.2 導波路型ホモジナイザにおける干渉縞の抑制

隣接する分割ビーム同士を干渉させないために、一方の分割ビームに時間的な可干渉距離以上の時間的遅延をおこなう方法を検討する。

レーザービームの時間的可干渉距離 ΔL は、レーザーの波長とスペクトル幅で定義され、パルスグリーンレーザー(YAGレーザーの第二高調波)では、 ΔL は、 $\Delta L = 4 \sim 10$ mmとなる。実際に、レーザービームの時間的可干渉距離を測定したところ、干渉縞のレジビリティが5%以下となるのは、 $\Delta L = 12$ mmであった。石英ブロックにより、可干渉距離相当の光路差を設けるためには $L = 24$ mm以上の厚みにする必要がある。奇数回反射の成分を偶数回反射の成分に対して時間的遅延をかければよい。例えば、Fig. 7に示すように、導波路で分割されたビームがお互いに分離する位置に交互に石英ブロックを配置すれば、照射ビーム上での干渉縞の発生は抑制できる。しかし、実際の光学系では、分離された分割ビームの間隔が狭く、石英ブロックを配置できない。

分割された導波路から出射されたビームに対し、交互に石英ブロックを設置する必要があるのは、導波路内で反射されない成分(D)が存在するためである。そこで、導波路内を、反射することなく直進する分割ビームを含まないように、全ての分割ビームが少なくとも一回は反射

Fig. 7 Reduction of interference fringes for waveguide plate homogenizer.

するように導波路によりレーザービーム分割する。そのためにはFig. 8に示すように、導波路の中心軸に対して、導波路の入射面を傾けることによって実現できる。いわゆる斜め入射面導波路を用いる。

導波路の入射面を傾けることによって、導波路に入射するビームが曲げられ、Fig. 9に示すように斜めからレーザービームが入射された構成と同じ状態になり、分割前に隣接する分割ビームである導波路内で奇数回反射する成分と偶数回反射する成分が、導波路の中心光軸を挟んで分離する。従って、例えば奇数回反射の分割ビームの光路に、石英ブロックを設置し、光学的遅延を設けることで、隣接する分割ビームに対して全て時間的可干渉距離より大きな遅延をかけられるので、干渉が起こらず、干渉縞が発生しない。

Fig. 10に本構成による分割ビームの重ね合わせ時の均一化方向強度分布を示す。(a)は、照射ビームの強度分布であり、光学的遅延素子である石英板の挿入により、干渉縞の発生が抑制され、干渉による強度分布の変動がないことがわかる。また、(b)は、ビーム照射後のポリシリコン結晶を光学顕微鏡で観測した写真である。照射ビームに干渉縞がある場合、局部的に照射強度が高くなるので変色しており、均質なポリシリコン結晶が生成されていない。一方、石英板の挿入により、局部的な変色はなく、均質なポリシリコン結晶が生成されていることがわかる。

5. 結果

Fig. 11に、本光学系により得られた線状ビームのプロファイルを示す。(a)は幅方向(x)、(b)は長手方向(y)である。ビーム形状は、 $105 \text{ mm} \times 38 \mu\text{m}$ (FWHM)である。また、長手方向のビーム均一性は、3%以内で、均一領域は、102 mmである。仮に、パルス出力50 mJのパルスグリーンレーザー発振器を用いると、最大 800 mJ/cm^2 のエネルギー密度で照射できる。

Fig. 8 Reduction of interference fringes with oblique-incidence surface waveguide plate.

Fig. 9 Developed view of Oblique-incidence surface waveguide plate.

Fig. 10 Result of reducing interference fringes.

Fig. 11 Beam profile obtained with developed optical system.

6. まとめ

パルスグリーンレーザー用アニール光学系として、発振器から放出されるガウス強度分布に近い円形ビームを均一なラインビームに変換する光学系を開発した。ラインビームの幅方向は、レーザービームの M^2 値で決まる最小幅まで集光し、薄膜上で光強度を最大化した。一方、長手方向は、エキシマレーザーより干渉性が高いパルスグリーンレーザービームに対し、導波路で均一化する際に干渉する成分に光学的遅延を加えることにより、干渉縞の発生を抑制することで、均一な強度分布を得た。

これにより、エキシマレーザーより維持費用が低減できるパルスグリーンレーザーへの置き換え、さらには、パルスグリーンレーザーを用いた高品質TFTを量産する生産ラインへの適用が可能になる。

参考文献

- 1) N. Matsuo, Y. Aya, T. Kanamori, T. Nouda, H. Hamada, and T. Miyoshi: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 351.
- 2) T. Ogawa, H. Tokioka, K. Furuta, Y. Sato, M. Inoue, S. Yagi, M. Miyasaka, S. Inoue, and T. Shimoda: EuroDisplay '99 Late news paper (1999) p. 81.
- 3) K. Tamagawa, H. Ikeda, T. Ohnishi, K. Kuwahara, M. Kikuchi, M. Hayama, and K. Nakamura: IDW '03 Digest (2003) 585.
- 4) K. Morikawa, T. Okamoto, T. Kojima, S. Yura, J. Nishimae, Y. Sato, M. Inoue, and H. Nagata: SID '04 Digest (2004) 1088.