VI. エキシマレーザアニール多結晶シリコン薄膜トランジスタ

金子 節 夫 [日本電気(株)機能エレクトロニクス研究所]

1. はじめに

液晶や光電変換素子を薄膜トランジスタ (TFT) で駆動する液晶ディスプレイ⁽¹⁾⁽²⁾や密着形イメージセンサ⁽³⁾、液晶プリンタ⁽⁴⁾などの入出力デバイスが情報・映像機器の急速な普及と薄形軽量への要求を背景に各研究機関で活発に研究開発され、実用化の段階を迎えている。薄膜トランジスタ用薄膜半導体材料としてはこれまで主に水素化非晶質 Si が用いられてきたが、入出力デバイスのさらなるコンパクト化と性能向上にむけ、低価格ガラス基板上へ低温成膜 (約 600°C 以下) が可能で、非晶質 Si (移動度 $0.2 \sim 1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) の 10~1,000 倍の高移動度化が期待できる多結晶 Si が注目されている。

高移動度多結晶 Si 薄膜を得る方法としては固相成長法⁽⁵⁾やレーザアニールなどによる再結晶化法⁽⁶⁾⁽⁷⁾がある。レーザアニールに用いられるレーザ光は Ar レーザなどの CW レーザ光⁽⁶⁾とエキシマレーザ⁽⁷⁾などのパルスレーザ光があるが、ガラス基板への熱的影響が少なく、大出力で照射領域の広くとれるパルスレーザ光による低温アニール技術が注目されている。

本稿では、エキシマレーザを用いたパルスレーザアニールによる多結晶 Si 薄膜の構造、性質および TFT への応用およびその特性について解説する。

2. エキシマレーザアニール法

パルス光を用いたレーザアニール技術は、高エネルギー (約 1 J/パルス) のレーザ光を比較的大面積 (数 $\text{mm}^2 \sim$ 数 cm^2) に数十 ns の短時間で照射でき、熱的な影響がレーザ光照射されたごく表面近傍にとどまることから、浅い接合層形成用レーザドーピング技術⁽⁸⁾、LSI 実装基板の多層配線加工技術⁽⁹⁾などの研究開発が行われている。このパルスレーザ光としては、ルビレーザ (694 nm)、Nd-YAG レーザ (532 nm : 二次高調波)、ガラスレーザ (531 nm)、エキシマレーザ (193~308 nm) などが用いられている。

図 1 には水素化非晶質 Si ($a\text{-Si:H}$)、非晶質 Si

図 1 結晶 Si ($c\text{-Si}$)、非晶質 Si ($a\text{-Si}$)、水素化非晶質 Si ($a\text{-Si:H}$) の吸収係数およびパルスレーザの波長

図 2 エキシマレーザアニール装置

($a\text{-Si}$)、結晶 Si ($c\text{-Si}$) の吸収係数とパルスレーザ光の波長を示す⁽¹⁰⁾。エキシマレーザは、この中で最も短波長光であるため上記薄膜の吸収係数が 10^6 cm^{-1} 以上と大きく、表面約 10 nm 以下にレーザ光エネルギーが吸収される。また、レーザ光の均一性も良く、繰返し周波数も高く (約 1 kHz) できるため大面積低温 TFT プロセスに適している。

代表的なエキシマレーザには、XeCl レーザ (波長 308 nm)、KrF レーザ (波長 248 nm)、ArF レーザ (波長 193 nm) があるが、光学的に使いやすく、動作安定、長寿命な XeCl レーザがプロセスによく用いられている⁽¹¹⁾。

図 2 には、エキシマレーザを用いたアニール装置の模式図を示す。アニール装置はエキシマレーザ装置、

VI. Excimer Laser Annealed Poly-Crystalline TFT. By Setsuo Kaneko (Functional Devices Labs., NEC Corporation).

キーワード: エキシマレーザアニール, 入出力デバイス, 多結晶 Si, 薄膜トランジスタ

ビームホモジナイザを含む光学系、X-Y 移動ステージを含む真空装置系から成り立っている。アニールに用いられるレーザ光はパルス幅 20~50 ns, パルスエネルギー 0.2~1 J である。ビームホモジナイザはコリメータ、フライヤレンズ、コンデンサレンズから構成され、エキシマレーザのガウス分布したビームプロファイルを数 mm 角の範囲で±5%以下の平坦なビームプロファイルに変換し、均一なアニール薄膜を得るためのものである。アニールは酸化防止などのため真空中または不活性ガス中で行われるが、不純物の汚染を避けるため Si 薄膜の表面に酸化膜を被覆することもある⁽¹²⁾。

3. エキシマレーザアニール多結晶 Si 薄膜

結晶化させる Si 薄膜としてはプラズマ CVD で作成された水素化非晶質 Si, LPCVD 法で形成された非晶質または多結晶 Si (p-Si), LPCVD で作成された多結晶 Si へ Si をイオン注入した非晶質 Si などを用いる。エキシマレーザ光照射により Si 薄膜の表面は短時間に温度が上昇し、しきい値エネルギー (E_{th}) 以上のレーザ光照射で溶融、再結晶化する。 E_{th} はレーザ光照射される Si 薄膜の構造、反射率、下地の熱伝導率などにより異なり、ガラス基板上に形成された PCVD 水素化非晶質 Si で 130 mJ/cm^2 ⁽¹³⁾, 85 mJ/cm^2 ⁽¹⁴⁾, 160 mJ/cm^2 ⁽¹⁵⁾, 180 mJ/cm^2 ⁽¹⁶⁾ が報告されている。また、Si をイオン注入して形成した非晶質 Si で 160 mJ/cm^2 ⁽¹⁷⁾, CVD 非晶質 Si では 140 mJ/cm^2 ⁽¹⁸⁾ が報告されている。非晶質 Si の液体への転移温度 (1,350 K) よりも融点の高い多結晶 Si (1,680 K) の E_{th} はこれらより若干高くなる。

Si 薄膜の溶融再結晶過程の解析には、レーザ光を用いた表面反射率の時間変化⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾, 薄膜のコンダクタンスの時間変化⁽¹³⁾⁽²⁰⁾ などが有効である。図 3 には、鮫島ら⁽¹³⁾が 30 nm の水素化非晶質 Si を用いて行った 1 パルスレーザ光照射時のコンダクタンスの時間変化

図 3 レーザ光照射時の非晶質 Si 膜のコンダクタンスの時間変化

を示す。レーザ光は半値幅 30 ns の XeCl エキシマレーザを用いている。溶融した Si のコンダクタンス ($12,000 \text{ S/cm}$)⁽²¹⁾に関連したコンダクタンスの時間変化が観測される。レーザ光照射強度増加によりコンダクタンスが増加し、溶融した Si の深さが増加する。溶融した Si の導電率から Si 薄膜すべてが溶融するレーザ照射強度は 240 mJ/cm^2 である。このとき、80 ns にわたり表面が溶融しており、固化速度は 0.6 m/s と非常に高速である。更に高エネルギーレーザ光照射においては、固化速度は更に速くなり、非晶質層が形成される⁽²²⁾こともあるので注意を要する。

一方、ガラス基板表面の温度については、ガラス基板上に Pt 薄膜を形成し、この上に SiO_2 , Si 薄膜を形成した試料で、レーザ光照射時の Pt 薄膜の導電率の時間変化を観測することにより測定されている。図 4 には 30 nm の Si 薄膜および 200 nm の SiO_2 膜の下にある Pt 薄膜の温度の時間変化を示す⁽¹⁶⁾。 210 mJ/cm^2 のレーザ光照射で最高でも Pt 膜は 380°C までの温度

図 4 レーザ照射時のガラス基板表面に形成した Pt 膜の温度の時間変化

レーザ強度

(a) 140 mJ/cm^2

(b) 160 mJ/cm^2

(c) 250 mJ/cm^2

図 5 水素化非晶質 Si へレーザ光照射した試料の断面 TEM 写真

上昇しなく、低価格ガラス基板を使用することができる。また、 SiO_2 膜を更に厚くすることにより、Pt 膜温度が 200°C 以下の温度上昇に抑えることができる。プラスチック基板の使用も表面保護層を設けることにより可能である。

レーザ光照射後の結晶構造については、X 線回折⁽¹⁴⁾、断面 TEM⁽¹⁷⁾⁽²³⁾を用いた解析が行われている。図 5 は水素化非晶質 Si 膜にレーザ光照射した後の Si 薄膜の断面 TEM 写真を示す。レーザ光強度 140 mJ/cm^2 の照射では、 10 nm 程度の微結晶 Si (FP) 層が非晶質 Si 膜の表面に形成される。 160 mJ/cm^2 の照射強度では、レーザ照射後の Si 薄膜は 3 層構造しており⁽¹⁷⁾、表面から比較的大粒径の多結晶 Si 層 (LP 層) と微結晶 Si 層 (FP 層) が比較的是っきりした境界を有して形成されている。この LP 層は熔融 Si からの再結晶化、FP 層は固相での結晶化により形成されていることが熱計算や熔融時の表面反射率の測定などから推測されている⁽²³⁾。更に、 250 mJ/cm^2 のレーザ光照射では LP 層の粒径は 100 nm 程度に大きくなり、Si 薄膜全体が多結晶化する。水素化非晶質 Si へのレーザアニールにおいては、このような高エネルギーのレーザ光照射をすると薄膜表面は波打ち荒れるが、これは非晶質 Si 中に約 10% 含まれている水素が爆発的に蒸発するためである。

照射強度を徐々に増加させレーザ光照射する多段階レーザ照射法⁽¹³⁾は、固液界面付近の水素のみを各パルスごとに放出させるので、爆発的な水素の蒸発がなく、表面荒れの少ないような薄膜を得る方法である。このとき、Si 薄膜中に残存している水素は 0.25% 以下になる。一方、水素を含まない CVD 非晶質 Si をレーザ光照射した場合には、図 6 に示されるように、このような表面荒れはなく平坦な多結晶 Si 薄膜が得られる。

再結晶化膜の X 線回折および透過電子顕微鏡の解析からは、 $\langle 111 \rangle$ に比較的優先配向をした⁽¹⁴⁾、 $10 \sim 80 \text{ nm}$ の粒状の薄膜であること⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、結晶粒内の欠陥は比較的少なく結晶粒界近傍での格子像の乱れも少な

レーザ光強度: 250 mJ/cm^2

図 6 CVD 非晶質 Si へレーザ光照射した試料の断面 TEM 写真

いこと⁽²⁶⁾が報告されており、固相成長多結晶 Si 膜が数 μm の大粒径針状結晶で、結晶欠陥が多いこと⁽²⁶⁾と比べると対照的である。

4. エキシマレーザアニール TFT

図 7 は、エキシマレーザを用いたプレーナ形 [(A 図)], 順スタガ形 [(B 図)], 多結晶 Si TFT のプロセス概略を示す⁽⁷⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。TFT プロセスは液晶ディスプレイなどで用いられている水素化非晶質 Si TFT または多結晶 Si TFT に比べエキシマレーザアニールプロセスを除いてほとんど同じプロセスである。

図 8 には CVD 非晶質 Si 膜に XeCl エキシマレーザアニールを行い作成した順スタガ形 n チャンネル多結晶 Si TFT ($W/L=100 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$) のドレーン電流-ゲート電圧特性のレーザ照射強度依存性を示す。TFT のソース-ドレーン領域にはイオン注入した n^+ または p^+ 多結晶 Si を用いた。レーザ照射強度の増加により

図 7 エキシマレーザアニールを用いたプレーナ形および順スタガ形の TFT プロセス

図 8 CVD $a\text{-Si}$ をエキシマレーザアニールして形成した n チャンネル TFT のドレーン電流-ゲート電圧特性

表 1 報告されているエキシマレーザアニールを用いた低温プロセス多結晶 Si TFT の特性

出発物質	レーザアニール条件 (mJ/cm ²)	TFT 構造	S/D 構造	TFT 形	I_{ON}/I_{OFF}	移動度 (cm ² /V·s)	しきい値 (V)	文献
a-Si:H (PCVD)	200 (XeCl)	プレーナ	I/I+ レーザドーピング	n	10 ⁵	180	3	(7)
a-Si:H (PCVD)	240 多段階照射 (XeCl)	プレーナ	n ⁺ p-Si レーザドーピング p ⁺ p-Si	n p	10 ⁷ 5×10 ⁶	54 20	3~4 —	(22)
a-Si:H (PCVD)	160 (XeCl)	順スタガ	n ⁺ a-Si	n	10 ⁶	100	8	(28)
a-Si (CVD)	210 (XeCl)	順スタガ	I/I	n p	10 ⁸ 10 ⁷	150 100	3 -3.5	(30)
a-Si (Si I/I)	200 (XeCl)	プレーナ	I/I	n	10 ⁸	30	3	(31)
p-Si (固相成長)	280 (XeCl)	プレーナ	I/I	n	10 ⁸	80	—	(31)

図 9 CVD 非晶質 Si をエキシマレーザアニールして形成した p チャネル TFT のドレイン電流-ゲート電圧特性

ON 電流が増加し電界効果移動度は 210 mJ/cm² のレーザ光照射で 150cm²/V·s まで増加する。このとき I_{ON}/I_{OFF} は 10⁸、しきい値電圧は 3 V である。移動度の急激な増加はレーザ光照射による Si 薄膜の熔融再結晶化によく対応している。また、p チャネル多結晶 Si TFT については図 9 に示されるように 210 mJ/cm² のレーザ照射で電界効果移動度 100 cm²/V·s、 I_{ON}/I_{OFF} は 10⁷、しきい値電圧 -3.5 V の特性が得られており、液晶ディスプレイなどの CMOS 高速駆動回路への適応が可能である。これら TFT 特性において、オフリーク電流の低減が課題であるが、ソース-ドレイン領域形成の最適化、多重ゲート構造⁽²⁾、オフセットゲート構造⁽²⁸⁾などのプロセス条件およびデバイス構造の最適化により解決できるものと思われる。

図 7 に示される TFT のソース-ドレイン (S-D) 領

域の形成には、通常不純物をドーピングした Si 薄膜やイオン注入 (I/I) などのイオンドーピング技術を用いるが、エキシマレーザ光を用いたレーザドーピングも大面積ドーピング技術として有望である。レーザドーピングには不純物ガス中でレーザ光を照射し、熔融 Si 表面に不純物を拡散させる方法 (GILD 法)、あらかじめ不純物の入ったドーパント層を形成し、レーザ光照射により不純物を熔融拡散させる方法 (LIMPID 法) がある。Coxon らは不純物ガスとして PCl₃ を用いた GILD 法によるレーザドーピングによるプレーナ形セルフアライン TFT を報告している⁽²⁹⁾。また、鮫島らは n⁺ または p⁺ 非晶質 Si を用いた LIMPID 法によるプレーナ形 CMOSTFT プロセスを提案している⁽²²⁾。

表 1 には、今までに発表されたエキシマレーザアニール TFT の構造および特性をまとめて示す。n チャネル TFT で電界効果移動度 30~180cm²/V·s、しきい値電圧 3~4 V、p チャネル TFT で電界効果移動度 20~100 cm²/V·s、しきい値電圧 -3.5 V を達成している。また、ドレイン電流温度依存性から求められる結晶粒界障壁 (E_b) のゲート電圧依存性も固相成長多結晶 Si TFT に比べて非常に小さく⁽³²⁾、エキシマレーザアニール多結晶 Si は結晶粒界の捕獲準位密度が小さいことが報告されている。

5. おわりに

エキシマレーザを用いることにより、耐熱性の低い安価なガラス基板へ性能の優れた多結晶 Si TFT を基板への熱的影響のない低温プロセスで形成することが

可能になった。エキシマレーザアニール多結晶 Si は結晶粒が 10~80 nm と細かくても、粒界での欠陥が少ないために、これを用いた TFT の電界効果移動度は $50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を超える性能を達成している。レーザ光アニールプロセスを含めた TFT プロセスの改善により、更に高移動度 TFT が再現良く得られるであろう。

本 TFT 形成プロセスは液晶ディスプレイなどの TFT マトリックスアレイ部とほとんど同等な低温プロセスで形成される。また、CMOS 化も可能である。従って、大面積の高速薄膜駆動回路を内蔵した液晶ディスプレイ、イメージセンサなどの入出力デバイスを実現する有力な TFT 技術である。

(平成 2 年 9 月 10 日受付)

文 献

- (1) T. Nagayasu, T. Okeyasu, T. Hirobe, H. Kato, S. Mizusima, H. Take, K. Yano, M. Hijikigawa & I. Washizuka: Int. Display Research Conf., p. 56 (1988)
- (2) S. Morozumi, K. Oguchi, T. Misawa, R. Araki & H. Ohshima: Soc. Information Display 1984 Symp. Dig., p. 316 (1984)
- (3) S. Kaneko, F. Okumura, M. Sakamoto, H. Uchida & Y. Kajiura: Proc. SPIE, 617, 127 (1986)
- (4) F. Okumura, K. Sera, H. Asada, S. Kaneko, H. Ichinose, S. Naemura, K. Tanaka, T. Yokoi & C. Tani: IEEE Trans. Electron Devices, ED-36, 1900 (1989)
- (5) T. Noguchi, H. Hayashi & T. Ohshima: J. J. Appl. Phys. 25, L121 (1986)
- (6) J. R. Troxell, M. I. Harrington & R. A. Miller: IEEE Electron Device Lett. EDL-8, 576 (1987)
- (7) T. Samejima, S. Usui & M. Sekiya: ibid. EDL-7, 276 (1986)
- (8) T. F. Deutsch, J. C. C. Fan, G. W. Turner, R. L. Chapman, D. J. Ehrlich & R. M. Osgood, Jr.: Appl. Phys. Lett., 38, 144 (1981)
- (9) F. Bachmann: Abstr. MRS Fall Meet. Symp., B-6-1, p. 76 (1989)
- (10) E. Fogarassy, R. Stuck, J. J. Grub & P. Stiffers: J. Appl. Phys., 52, (1981)
- (11) 堀田: レーザ研究, 16, 44 (昭 63)
- (12) Y. Morita & T. Noguchi: J. J. Appl. Phys. 28, L309 (1989)
- (13) T. Samejima, M. Hara & S. Usui: ibid. 28, L2131 (1989)
- (14) E. L. Mathe, J. G. Maillou, A. Naudon, E. Fogarassy, M. Elliq & S. De Unamuno: Appl. Surface Sci. 43, 142 (1989)
- (15) K. Sera, F. Okumura, S. Kaneko, S. Itoh, K. Hotta & H. Hoshino: J. Appl. Phys., 67, 2359 (1990)
- (16) R. Z. Bachrach, K. Winer, J. B. Boyce, S. E. Ready, R. I. Johnson & G. B. Anderson: J. Electric Mat., 19, 241 (1990)
- (17) J. Narayan, C. W. White, M. J. Aziz, B. Stritzker & A. Walthuis: J. Appl. Phys., 57, 564 (1985)
- (18) D. H. Lowndes, R. F. Wood, J. Narayan: Phys. Rev. Lett., 47, 561 (1985)
- (19) F. Foulon, E. Fogarassy, A. Slaoui, C. Fuchs, S. Unamuno & P. Siffert: Appl. Phys. A, 45, 361 (1988)
- (20) G. J. Galvin, M. O. Thompson, J. W. Mayer, R. B. Hammond, N. Paulter & P. S. Peercy: Phys. Rev. Lett. 48, 33 (1982)
- (21) V. M. Glazov, S. N. Chizhenskaya & N. N. Glagoleva: Liquid Semi-conductors p. 60 (1969) Plenum Press, New York
- (22) T. Samejima, M. Hara, N. Sano & S. Usui: Ext. Abstr. 22nd Conf. Solid State Devices Mater. p. 967 (1990)
- (23) J. G. Maillou, E. L. Mathe, J. C. Desoyer, S. De Unamuno & E. Fogarassy: Appl. Surface Sci., 43, 150 (1989)
- (24) 鮫島・原・富田・碓井: 応用電子物性分科会研究報告, No. 427, p. 31 (平元)
- (25) Y. Morita & T. Noguchi: J. J. Appl. Phys., 28, L309 (1989)
- (26) 小西・青山・小野: 応用電子物性分科会研究報告, No. 432, p. 13 (平 2)
- (27) T. Samejima, M. Hara & S. Usui: J. J. Appl. Phys., 28, 1789 (1989)
- (28) K. Sera, F. Okumura, H. Uchida, S. Itoh, S. Kaneko & K. Hotta: IEEE Trans. Electron Devices, 36, 2868 (1989)
- (29) P. Coxon, M. Lloyd & P. Migliorato: Appl. Phys. Lett., 48, 1985 (1986)
- (30) 世良・奥村・浅田・伊藤・金子・堀田: 第 50 回応用物理学会学術講演会予稿 27a-A-3, p. 539 (昭 58)
- (31) T. Noguchi, K. Tajima & Y. Morita: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., No. 146, p. 35 (1989)
- (32) H. Hayama: Ext. Abstr. 22nd Conf. Solid State Devices Mater., p. 1007 (1990)

金子節夫

昭和 50 年東北大学大学院工学部電子工学科修士課程修了。同年 4 月日本電気(株)入社, 中央研究所勤務。平成元年機能エレクトロニクス研究所, 現在に至る。