特 集

シリコン上 GaAs レーザー

神保孝志*・曽我哲夫*・梅野正義*

(1988年9月21日 受理)

GaAs Laser on Si Substrate

Takashi JIMBO*, Tetsuo SOGA* and Masayoshi UMENO*

(Received September 21, 1988)

DH, MQW and TJS lasers are fabricated on Si substrate by MOCVD. The characteristics are examined at room temperature by pulse current of excitation. The lowest threshold current 115mA is obtained with a MQW structure. The characteristics are still slightly inferior to the ones on GaAs substrate, but would make possible the integration of Si electronics with high-speed opto-electronic functions in the near future.

Key Words: Laser on Si, MOCVD.

1. はじめに

Si基板上に高品質 GaAs 結晶をエピタキシャル成長することができれば、

1) Siデバイスと GaAs デバイスのモノリシック集積化が可能になる

2) 大面積基板が(安価に)得られるようになり GaAs デバイスの大規模集積化や光集積回路が(安価に)可能になる

などの特長があり、GaAs 超高速デバイスと Si 大規模集積回路、GaAs 発光デバイスと Si ICなどを組み合わせて光(多重)配線を利用した大規模並列処理計算機、高効率タンデム型波長分割太陽電池あるいは全く新しい光電子集積回路などの実現可能性がある。

しかしながら GaAs/Siの結晶成長には

1) Siが無極性のダイヤモンド構造であるのに対して GaAs は有極性の閃亜鉛構造であるため成長した結晶の中に Ga-As の順でならんだ部分と As-Ga の順でならんだ部分(APD: Anti-Phase Domain)が生じる

2) Siの格子定数が 0.357 nm であるのに対して GaAs では 0.357 nm と約 4% の格子不整合(ミスフィット)があるためミスフィット転位が発生する

3) Siの熱膨張係数が $2.6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ であるのに対して GaAs では $5.9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ と大きな差があるので、700 °C 付近で成長したウエハを室温まで降温すると、GaAs 内には 10^9 dyn/cm^2 程度の応力が発生し、ウエハが反ったりクラックが発生する場合がある

などの問題点があり、これらを解決するための

* 名古屋工業大学電気情報工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

* Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology (Showa-ku, Nagoya, 466)

研究が盛んになされている¹⁾。

GaAs/Siのエピタキシャル法としてはMOCVD(Metalorganic Chemical Vapor Deposition)またはMBE(Molecular Beam Epitaxy)が用いられ、APDの発生を抑える方法としては(100)面から僅かに傾いた基板を用いる方法が一般に用いられている。ミスフィットなどの問題解決にはSi基板とGaAs成長層の間にGeや歪超格子などの中間層を挿入する方法と低温成長GaAs層を緩衝層とする方法(2段階成長法)が一般的である。

GaAs光デバイスとSi電子デバイスを一体化する第一歩としてSi基板上にGaAsレーザーを作製する試みがこれまでもいくつか報告されており特性の改善もすすんできているが²⁻¹⁷⁾、ここでは、歪超格子を中間層としてMOCVD法によってSi上に成長させたGaAs結晶を用いて試作したレーザーの特性を報告する。

2. DHレーザーとMQWレーザーの作製

基板は(100)面n-Siで、APDの発生を防ぐために〈011〉方向に2度オフさせてある。Si基板を $\text{PH}_3 + \text{H}_2$ 雰囲気中で $950^\circ\text{C} \cdot 10$ 分間

加熱処理した後、MOCVD法によって 900°C でGaPを50nm成長させた。GaPの格子定数は0.5451 nmでSiとほぼ等しいので、直接Si上にGaAsを成長させる場合に比べてミスフィット転位の発生ははるかに少ない。引き続き 680°C でGaP/GaAs_{0.5}P_{0.5}とGa_{0.5}As_{0.5}P/GaAsをそれぞれ5周期ずつ、計2段の歪超格子を成長させてGaP/GaAs間の格子不整合を緩和させた上に 650°C でノンドープGaAs層を $0.5\ \mu\text{m}$ 成長したものをレーザー用基板として使用した。歪超格子を構成する各層の厚さは20nmである。

ウエハは一旦リアクタから取り出した後、別のMOCVD装置を用いて 675°C でレーザー構造ウエハを成長させた。基板上にSeドープn-GaAs($n = 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $1.8\ \mu\text{m}$), Seドープn-Al_{0.3}Ga_{0.7}As($n = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $1.5\ \mu\text{m}$), 活性層, Znドープp-Al_{0.3}Ga_{0.7}As($p = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $1.5\ \mu\text{m}$), Znドープp-GaAs($p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $0.6\ \mu\text{m}$)を順次成長させた。活性層は、DHレーザーの場合ノンドープのGaAs・ $0.1\ \mu\text{m}$, MQWレーザーの場合はノンドープのGaAs (37nm) / Al_{0.4}Ga_{0.6}As (50nm)を5周期である。

240 nmのSiO₂を高周波スパッタ法で堆積し、

Fig. 1 Schematic diagram of the laser structure. The active layer is GaAs (DH laser) or 5 periods of GaAs/AlGaAs (MQW laser).

Fig. 2 Power output vs pulsed drive current of the MQW laser on Si.

6 ~ 7 μm のストライプ窓を形成したウエハの Si 側を研磨して 50 μm 程度の厚さにした後, p 側 n 側にそれぞれ Au/Zn/Au と Au/Sb/Au を蒸着・熱処理してオーミック電極とした。共振器は通常の劈開によって形成し, p 側 up の状態で Cu のヒートシンクにマウントして特性を測定した。

試作したレーザーの構造を Fig. 1 に示す。尚, 比較のため, GaAs 基板の上にも同じ構造の DH レーザーを試作した。

3. DH レーザーと MQW レーザーの特性

室温 (293 K) における MQW レーザーのパルス動作 (パルス幅 100 ns, 繰り返し 1 kHz) での電流-光出力特性を Fig. 2 に示す。また, 試作したレーザーについてその閾値電流を同じ条件で測定した結果をヒストグラムにして Fig. 3 に示す。

レーザー閾値電流の平均値は GaAs 上の DH レーザーでは 270 mA, Si 上の DH レーザーでは 528 mA, Si 上の MQW レーザーでは 324 mA が得られた。結晶の劈開性の差のため, 平均キ

Fig. 3 Distribution of the threshold current of the laser diodes on Si and GaAs.

Fig. 4 Temperature dependence of the threshold current.

ャビティ長は GaAs 上のレーザーでは 157 μm , Si 上のレーザーでは 131 μm であり, 閾値電流の差の原因の一つになっている。Si 上のレーザーの最小閾値電流値として MQW 構造で 115 mA が得られた。GaAs 上の DH レーザーの微分量

Fig. 5 Lasing spectra of the DH laser (a) and the MQW laser (b).

Fig. 6 Polarization characteristics of the laser diodes on Si (a) and on GaAs (b).

子効率の最大値は11.5%, MQW レーザーでは20.9%であった。

閾値電流の温度依存性をFig. 4に示す。GaAs 上のMQW レーザーの場合特性温度 T_0 の値として素子温度が35℃以上では80 K, 35℃以下では214 Kが得られた。

Si上のレーザーの閾値電流はGaAs上のレーザーよりも高いにもかかわらず最大光出力は100 mW以上でGaAs上のものと差がなかった。これはSiの熱伝導率が大い効果が現れているものと考えている。

Fig. 5はSi上レーザーの発振スペクトルである。DH構造のレーザーでは多くのモードが同時に発振し、発振スペクトルが広がっているが、MQW構造にすることにより発振スペクトル幅を狭めることができた。

MQW構造でも発振波長はDHレーザーとほ

ぼ等しいがこれは量子井戸の幅がかなり広いからである。より量子化の効果が明瞭に現れるように狭い量子井戸を用いた素子も試作したが、閾値電流は増加した。これは光損失の増加によるものであり、結晶表面(各層間の界面)のモロロジー改善の必要がある。

作製したレーザーの偏光特性を測定した結果をFig. 6に示す。GaAs上のレーザーは全てTEモードのみで発振していた。これに対してここで特性を示したSi上のレーザーはDH・MQWともTMモードのみまたはTE・TM両方のモードで発振している。

一方、クラッド層を $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ にしたSi上のDHレーザーではTEモードのみで発振した。クラッド層を $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ にしたSi上の素子ではTEまたはTE・TM両方で発振したが、TEモードで発振している素子も冷却すると200 K以下ではTMモードのみの発振になった。

試作したレーザーの偏光特性は熱応力によるGaAs価電子帯端のスプリットにより生じていると考えている。即ち、SiとGaAsの熱膨張係数の差により生じる応力でGaAsの価電子帯頂上の縮退が解け、TEモードよりTMモードのほうが利得が大きくなり、Si上のレーザーではTMモードが発振し易くなる¹⁸⁾。 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ をクラッド層として使用した場合はTEモードに対する端面反射係数がTMモードの反射係数より遥かに大きいので¹⁹⁾結局TEモードの発振が起こる。低温では応力が大きくなることと正孔の熱エネルギー広がり小さくなることからTMモードに対する利得が一層大きくなる。従って室温でTEモードとTMモードの[利得ー損失]がほぼ等しければ低温ではTMモードが発振することになる。

これらのレーザーはこれまで室温では連続発振していないが、一部は130 K以下の低温で連続発振する。

4. TJS レーザー

集積化を容易にするためには電流注入の方法やレーザーキャビティ作製の方法に工夫が必要

Fig. 7 Schematic diagram of the TJS laser on Si.

である。ここでは集積化に有利な横方向電流励起で且つ閾値電流密度を下げるができる可能性があるTJSレーザーを試作した。素子の構造をFig. 7に示す。基板がp-Siであり、活性層以外の成長層が全てSeドーパドである以外はDHレーザーの場合と基本的におなじである。Ar+H₂ (30%)でスパッタしたSiO₂を拡散マスクとしてZnを閉管法で650℃で45分間拡散させて横方向接合を形成した。キャビティ形成、オーミック電極、特性測定条件などはDHレーザーの場合と同一である。

Si上のTJSレーザーで得られた最低閾値電流は379 mAでこの素子の微分量子効率率は2.2%であった。30個の素子の閾値電流の平均値は960 mAである。p領域の面積に対する閾値電流の依存性の測定から、AlGaAsクラッド層内のpn接合を通してかなりの電流が洩れていることが明らかになった。これが閾値電流が大きい原因であり、SiとDH構造の間に高抵抗層を作ることによってこの洩れ電流を減らし、閾値電流の低化が図れると期待できる。

5. まとめ

Si上に歪超格子を中間層としてGaAsを成長させた。このGaAsを用いて試作したAlGaAs/GaAs DHレーザー・MQWレーザーおよびTJSレーザーの特性を報告した。全ての結晶成長にスループットの大きなMOCVD法を採用している。

これまでにSi上のレーザーで100 mA付近の閾値電流を持つものが得られており、MBEを利用したものでは室温連続発振の報告もある¹⁵⁻¹⁷⁾。結晶成長法の改良やレーザーの構造・作製プロセスの最適化によりレーザーの特性はさらに向上すると期待できる。

Si上にGaAsを成長させる技術が確立されればGaAsの発光・受光デバイスとSiの電子回路を一体化させた新しい機能素子や電子回路のチップ間あるいはボード間の光配線が実現できる。

参 考 文 献

- 1) 例えば Materials Research Society 1988 Spring Meeting (Reno, Nevada, April 5-9, 1988) Symposium A.
- 2) S. Sakai, T. Soga, M. Takeyasu and M. Umeno: Jpn. J. Appl. Phys. **24** (1985) L666.
- 3) S. Sakai, T. Soga, M. Takeyasu and M. Umeno: Inst. Phys. Conf. Ser. **79** (1986) 751.
- 4) S. Sakai, T. Soga, M. Takeyasu and M. Umeno: Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 413.
- 5) T.H. Windhorn and G.M. Metzger: Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 751.
- 6) R. Fisher, W. Kopp, H. Morkoc, M. Pion, A. Specht, G. Burkhardt, H. Appelman, D. McGougan and R. Rice: Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 1360.
- 7) H. Shiraishi, R. Yamada, N. Matsui and M. Umeno: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L198.
- 8) H. Shiraishi, R. Yamada, N. Matsui and M. Umeno: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1012.

- 9) S. Sakai, H. Shiraishi and M. Umeno: IEEE J. Quantum Electron. **QE-23** (1987) 1080.
- 10) S. Sakai, X.W. Hu and M. Umeno: IEEE J. Quantum Electron. **QE-23** (1987) 1085.
- 11) R.D. Dupuis, J.P. van der Ziel, R.A. Logan, J.M. Brown and C.J. Pinzone: Appl. Phys. Lett. **50** (1987) 407.
- 12) J.P. van der Ziel, R.D. Dupuis, R.A. Logan, R.M. Mikulyak, C.J. Pinzone and A. Savage: Appl. Phys. Lett. **50** (1987) 454.
- 13) R.W. Kaliski, N. Holonyak, Jr., K.C. Hsieh, and D.W. Nam, J.W. Lee, H. Shichijo, R.D. Burnham, J.E. Epler and H.F. Chung: Appl. Phys. Lett. **50** (1987) 836.
- 14) T.C. Chong and C.G. Fonstad: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 221.
- 15) D.G. Deppe, N. Holonyak, Jr., D.W. Nam, K.C. Hsieh, G.S. Jackson, R.J. Matyi, H. Shichijo, J.E. Epler and H.F. Chung: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 637.
- 16) D.G. Deppe, D.W. Nam, N. Holonyak, Jr., K.C. Hsieh, R.J. Matyi, H. Shichijo, J.E. Epler and H.F. Chung: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 1271.
- 17) H.Z. Chen, A. Ghaffari, H. Wang, H. Morkoc and A. Yariv: Opt. Lett. **12** (1987) 812.
- 18) N.B. Patel, J.E. Ripper and P. Brosson: IEEE J. Quantum Electron. **QE-9** (1973) 338.
- 19) T. Ikegami: IEEE J. Quantum Electron. **QE-8** (1972) 470.