

第4章

Si 基板上 GaAs 太陽電池の高効率化

4.1 はじめに

太陽電池材料は Si の他、周期律表 III 族と V 族元素から構成される半導体、例えば GaAs や InP などの III-V 族化合物半導体、周期律表 II 族の元素と VI 族の元素から構成される半導体、例えば CdS や CdTe などの II-VI 族化合物半導体と広範囲にわたっている。従来、化合物半導体太陽電池は高性能だが価格が高いことから実用化が難しいと考えられていた。しかし、CdS/CdTe 太陽電池は低価格な太陽電池として実用化され、GaAs や InP 太陽電池も宇宙用として実用化されるに至っている。また、近年では II-VI 族化合物の変形の化合物半導体であるカルコパイライト化合物（例えば、CuInSe₂ などの I-III-V 族化合物）を用いた太陽電池の研究開発も盛んになっている（表 1-1）。さらに、III-V 族においても低価格化をねらった新しい技術も開発されており、化合物半導体太陽電池の研究開発も着実に進展している。

本研究では低価格化と高効率化をねらった GaAs/Si タンデム型太陽電池を採用した。Si 基板上 GaAs 太陽電池は両者の物性定数の違いから発生する転位などが高効率化の妨げになっている。この章では Si 基板上 GaAs 太陽電池のプロセス法を簡単に説明し、特に前章で転位の低減を行った Si 基板上 GaAs 層を用いた太陽電池の特性について述べる。

4.2 Si 基板上 GaAs 太陽電池の作製

MOCVD 法により Si 基板上に GaAs 層をエピタキシャル成長し、その後電極作製プロセスなどを行い、Si 基板上 GaAs 太陽電池を作製した。作製プロセスを図 4.1 に示す。

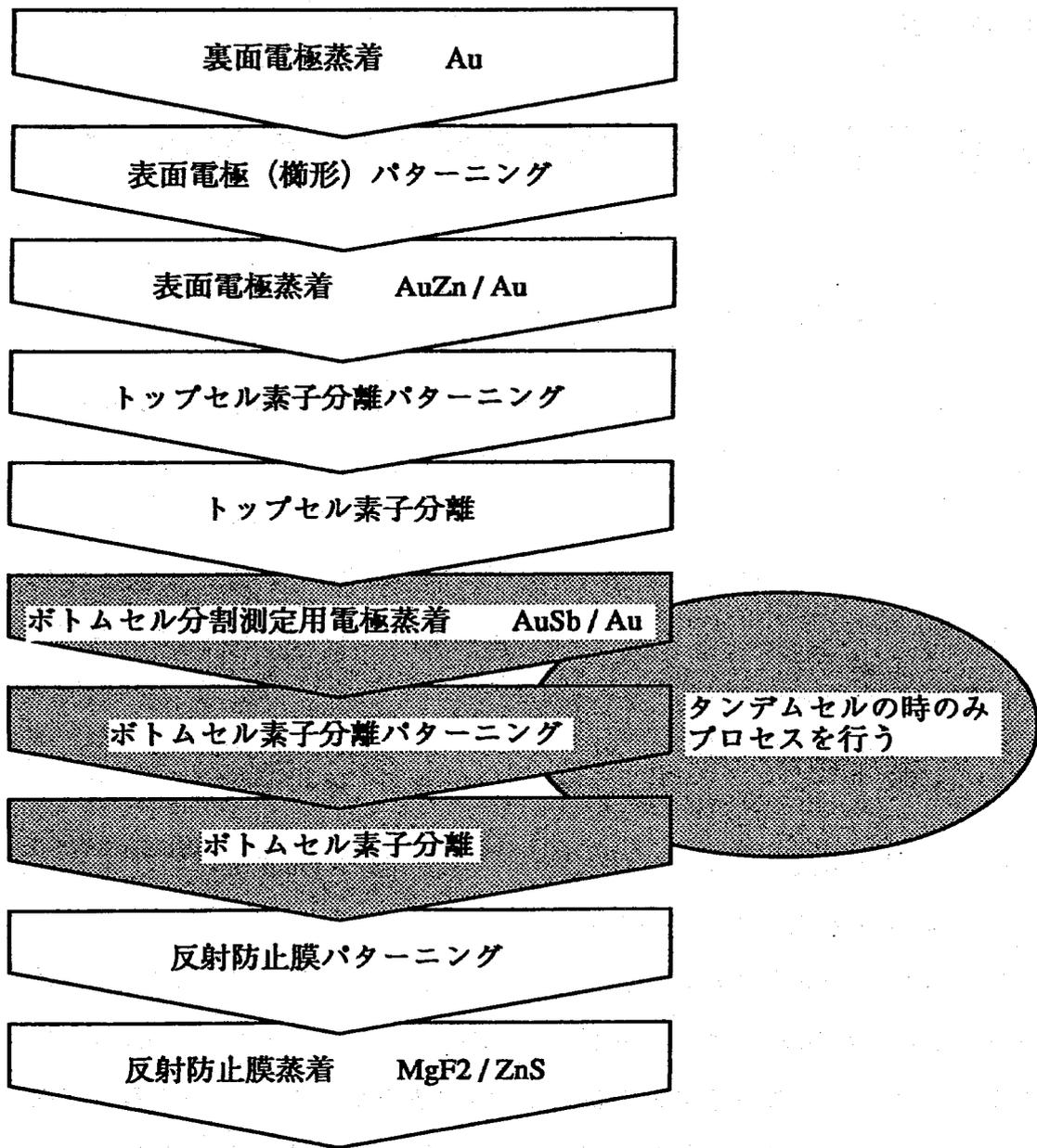


図 4.1: 太陽電池作製行程

4.3 太陽電池の特性評価法

本節では変換効率、量子効率の測定法を述べる。本研究室では WACOM 社製 WXS-105H のソーラーシュミレーターを用い、疑似太陽光として Xe ショートアークランプ (KXL-500F) を光源として使用した。Air Mass は化合物半導体太陽電池の特性を生かせる宇宙での使用を考慮して、AM0 (放射強度 $135.3\text{mW}/\text{cm}^2$) とし、セル温度は 27°C で一定とした。変換効率は真性変換効率として求め、計算は次の式に従う。

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{S \times 135.3} \times 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

量子効率については日本分光社製 SS-50 を用い、タングステンランプを光源として測定した。測定波長範囲は 400 から 1240 nm であり、20 nm 刻みで行った。以下に測定方法を記す。

まず、光検出器で各波長ごとの光源出力 TC を測定する。次に、各波長ごとの太陽電池の短絡電流 I_{sc} を測定する。分光感度を $R(\lambda)$ とすると以下のように示される。

$$R(\lambda) = \frac{I_{sc} hc}{q TC \lambda} \quad [\text{a.u.}] \quad (4.2)$$

$R(\lambda)$ をその中の最大値で規格化したものが相対分光感度 $SR(\lambda)$ であり、以下のように示される。

$$SR(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R_{max}} \quad (4.3)$$

次に $SR(\lambda)$ から、ソーラーシュミレーターで用いた Xe ショートアークランプで得られる電流 I_t を求める。

$$I_t = \sum_{\lambda=400}^{1240} \frac{E \lambda SR(\lambda) q}{hc} \quad (4.4)$$

E は Xe ショートアークランプのスペクトル [$\text{Wm}^2/20\text{nm}$]

上記のようにして求めた電流値と I_{sc} との比を $SR(\lambda)$ に掛けると量子効率が求められる。以下に述べる変換効率及び量子効率は以上のように計算を行うものとする。

4.4 高温熱サイクルアニールによる特性向上

前章において高温熱サイクルアニールによる Si 基板上 GaAs 層の特性改善について述べた。本節ではこの欠陥密度低減技術を用い、Si 基板上 GaAs 太陽電池を作製してその効果を検討した。

図 4.2 に作製した太陽電池の構造を示す。太陽電池の n 層は Si のオートドーピングによって形成し、p 層は内部電界発生機構の 1 つである (graded bandgap emitter layer ; GBEL) [2] [5] を採用した。

これらの太陽電池の諸特性を表 4-1 とそのばらつきを図 4.3 に示す。表 4-1 からわかるように熱サイクルアニール温度を高温にするに従ってその変換効率が向上しているのがわかる。また図 4.3 からわかるように温度が高温になるにつれて開放電圧と曲線因子の特性向上が見られる。開放電圧と曲線因子はそれぞれ (2.11) 式と (2.15) 式表されるため [1]、開放電圧を向上させるためには逆方向飽和電流 J_0 を低くするような太陽電池にしなければならない。 J_0 は次のように表される

$$J_0 = \left(\frac{qL_n}{\tau_n p_0} + \frac{qL_p}{\tau_p n_0} \right) N_c N_v \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) \quad (4.5)$$

J_0 は emitter 層、base 層それぞれの少数キャリア寿命やキャリア濃度によって決定され今回は高温熱サイクルアニールによって少数キャリア寿命が長くなったため、 J_0 が低く抑えられ開放電圧向上に寄与したと推測される。また、 FF に関しても結晶の膜質の向上が大きく寄与したことで向上したのではないかと考えられる。

結果的に開放電圧 0.90[V]、曲線因子 78.3% を得ることができ太陽電池の変換効率は 16.6% (AM0、1 sun、27°C) まで向上した。

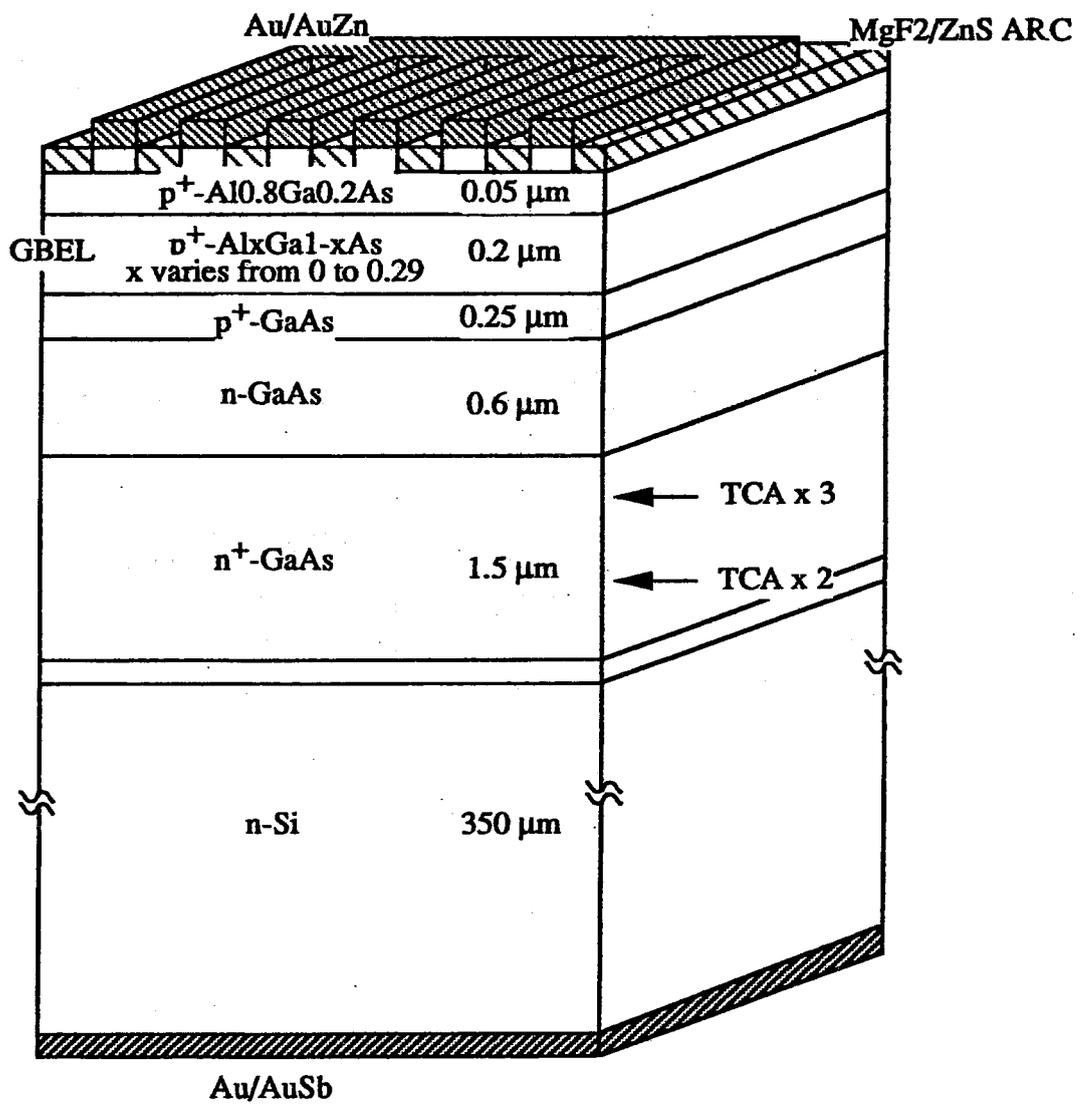


図 4.2: Si 基板上 GaAs 太陽電池の構造図

表 4-1: 各 TCA の Si 基板上 GaAs 太陽電池の変換効率

AM0, 1 sun, 27°C

TCA temperature	$J_{sc}[mA/cm^2]$	$V_{oc}[V]$	$FF[\%]$	$\eta[\%]$
300 ~ 900°C	32.5	0.87	77.4	16.1
300 ~ 950°C	31.7	0.89	78.2	16.3
300 ~ 1000°C	32.0	0.90	78.3	16.7

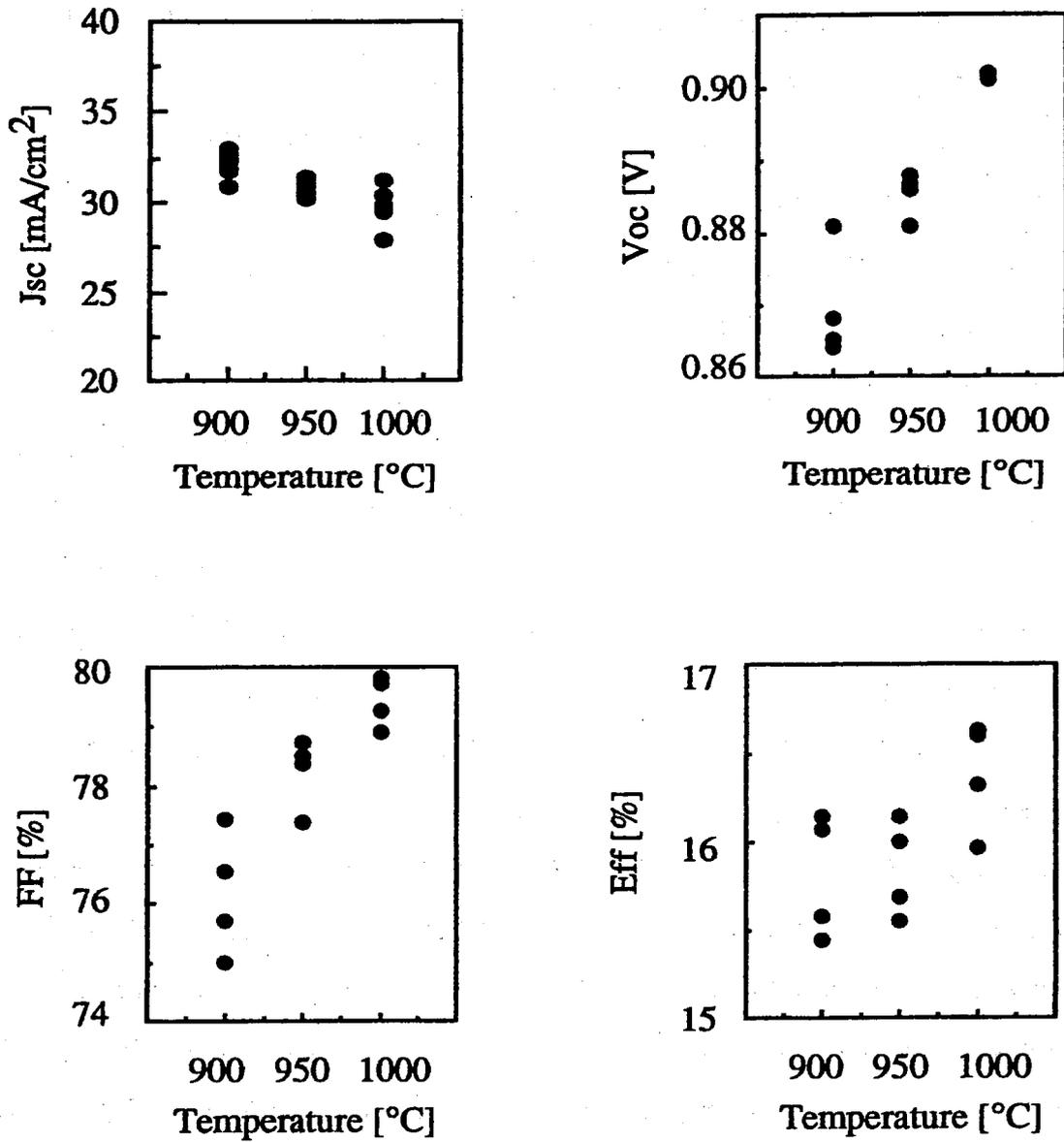


図 4.3: Si 基板上 GaAs 太陽電池の諸特性の分布

4.5 SLS 層を導入した太陽電池の諸特性

前章で Si 基板上 GaAs 層に SLS を導入したことによって TCA のみの試料に比べて少数キャリアライフタイムの特性が向上したことを報告した。ここではこの構造を用いた太陽電池の試作を行ったのでその諸特性について述べる。

前章では SLS を挿入した GaAs 層と TCA (300°C から 900°C) だけの試料について比較を行った。ここでもそれらの試料について太陽電池を作製した。TCA だけを行った太陽電池の構造は前節の図 4.2 と同じで SLS を導入した太陽電池の構造は図 4.4 に示す。この様に SLS を導入した太陽電池は TCA だけを行った太陽電池の buffer layer の膜厚が等しくなるように設計した。

これらの太陽電池の諸特性を表 4-2 に示す。この様に SLS を含む太陽電池の諸特性は悪化してしまった。特に曲線因子と開放電圧の特性悪化がうかがえる。また、図 4.5 に示すように量子効率を比較してみても TCA だけを施した試料に比べて SLS を導入した試料は全波長域に関して効率の落ち込みが見られた。結果的に SLS を導入した太陽電池の変換効率が悪くなってしまった。これについては次のことが考えられる。SLS を含む太陽電池の構造を考える際、TCA だけを含む太陽電池と異なる点は SLS 層付近に歪応力を起因とするミスフィット転位が多量に発生していることである。これは図 3.12 の EBIC 写真をを見ても明らかである。SLS を導入した太陽電池の構造では光電変換層はこのミスフィット転位が多量に存在する位置に非常に近い。このことによって曲線因子の特性が悪化し、それに伴い開放電圧も減少したと考えられる。また、転位密度が最小になるのは SLS からさらに $0.5\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ 成長した後であり、しかも SLS 近傍ではまだ結晶歪が残っているという報告がある [8]。そこで次にこのミスフィット転位の影響をできるだけ受けないようにするために SLS を成長した後、従来 $0.3\mu\text{m}$ GaAs を成長してその後光電変換層を成長していたものを SLS 成長後 $1\mu\text{m}$ GaAs を成長し、その後光電変換層を成長させた。この太陽電池の諸特性を表 4-2 に、量子効率を図 4.6 に示す。しかし、この様に buffer 層厚を増加させる前に比べて特性が向上するどころか、さらに曲線因子と開放電圧の特性が悪くなるとともに短絡電流密度も大幅に悪くなってしまった。そこで SLS と光電変換層の距離が十分離れていたかどうかを確認するためにこの試料の表面 EBIC 写真を観察したのでそれを図 4.7 に示す。この EBIC 写真を見ても

わかるように図 3.12 から観察されるような垂直に伸びる暗線欠陥は見られない。これからミスフィット転位から光電変換層が十分離れていることが分かる。しかし、今までの表面 EBIC には見られなかったクラックと思われる黒い線がはっきりと観察される。これはこの太陽電池を成長した試料の表面からもノマルスキによって観察することができた。これが今回の特性悪化の原因ではないかと考えられる。このクラックは Si 基板上 GaAs 層がその膜厚のために Si の引っ張り応力に耐えきれなくなったため発生したと思われる。このことから SLS から光電変換層までの膜厚は $1\mu\text{m}$ あれば十分であることがわかったが結果的には変換効率を向上させることができなかった。

この様に SLS を含む太陽電池を試作したがその変換効率は 15.1 % にとどまってしまった。しかし、Si 基板上の GaAs 層の臨界膜厚を越えない程度に SLS と光電変換層の間の膜厚を詳しく見直すことによってミスフィット転位の影響を少なくできることがわかった。今後、さらに構造を見直すことによって前章で紹介した少数キャリアライフタイムの特性向上に伴う変換効率の向上を期待したい。

表 4-2: SLS を導入したの Si 基板上 GaAs 太陽電池の変換効率

構造	AM0, 1 sun, 27°C			
	$J_{sc}[\text{mA}/\text{cm}^2]$	$V_{oc}[\text{V}]$	$FF[\%]$	$\eta[\%]$
TCA 300 ~ 900°C	32.5	0.87	77.4	16.1
SLS (buffer $1.5\mu\text{m}$) + TCA	32.2	0.85	74.9	15.1
SLS (buffer $2.2\mu\text{m}$) + TCA	28.9	0.83	71.9	12.7

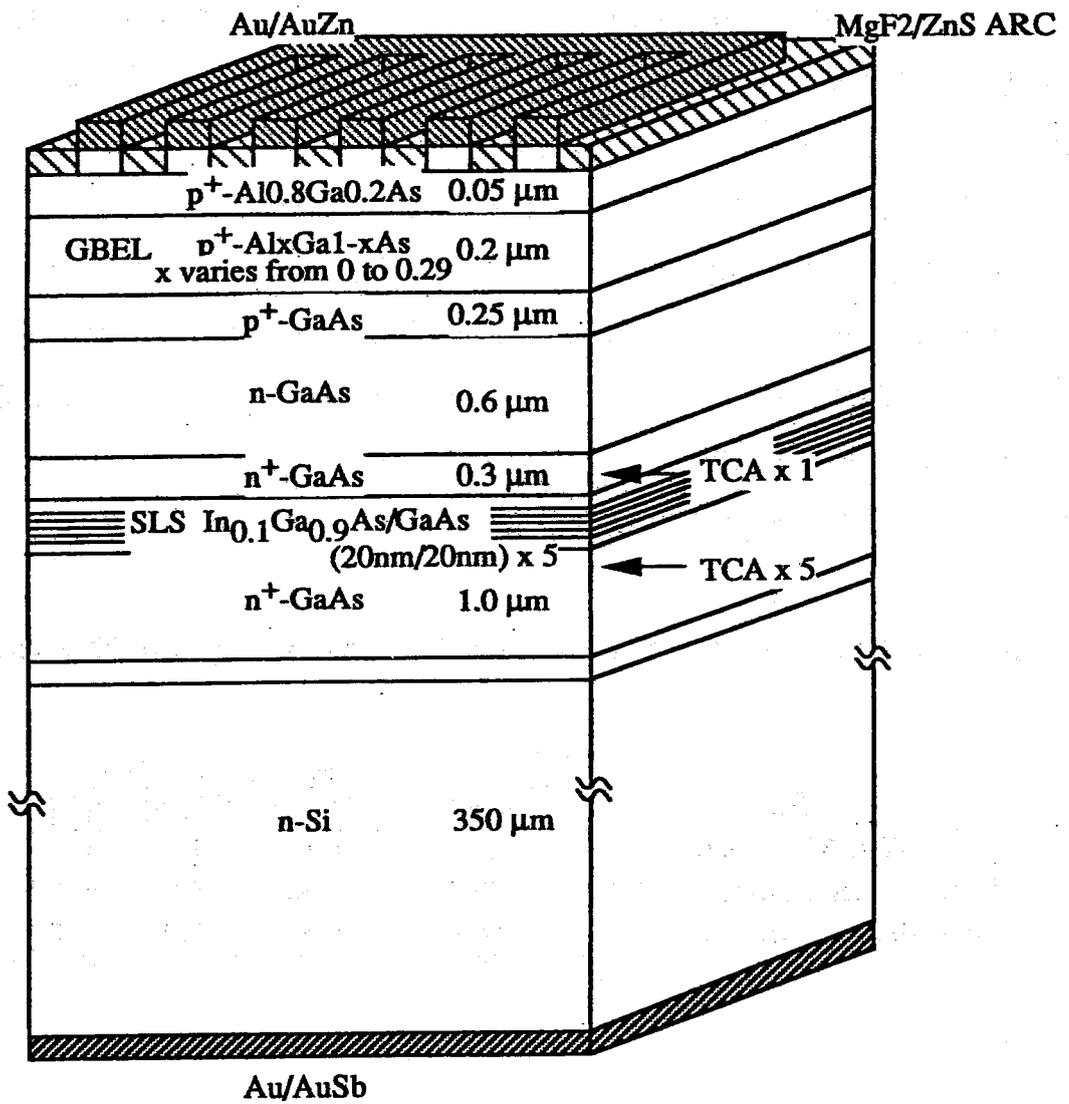


図 4.4: SLS を導入した Si 基板上 GaAs 太陽電池の構造図

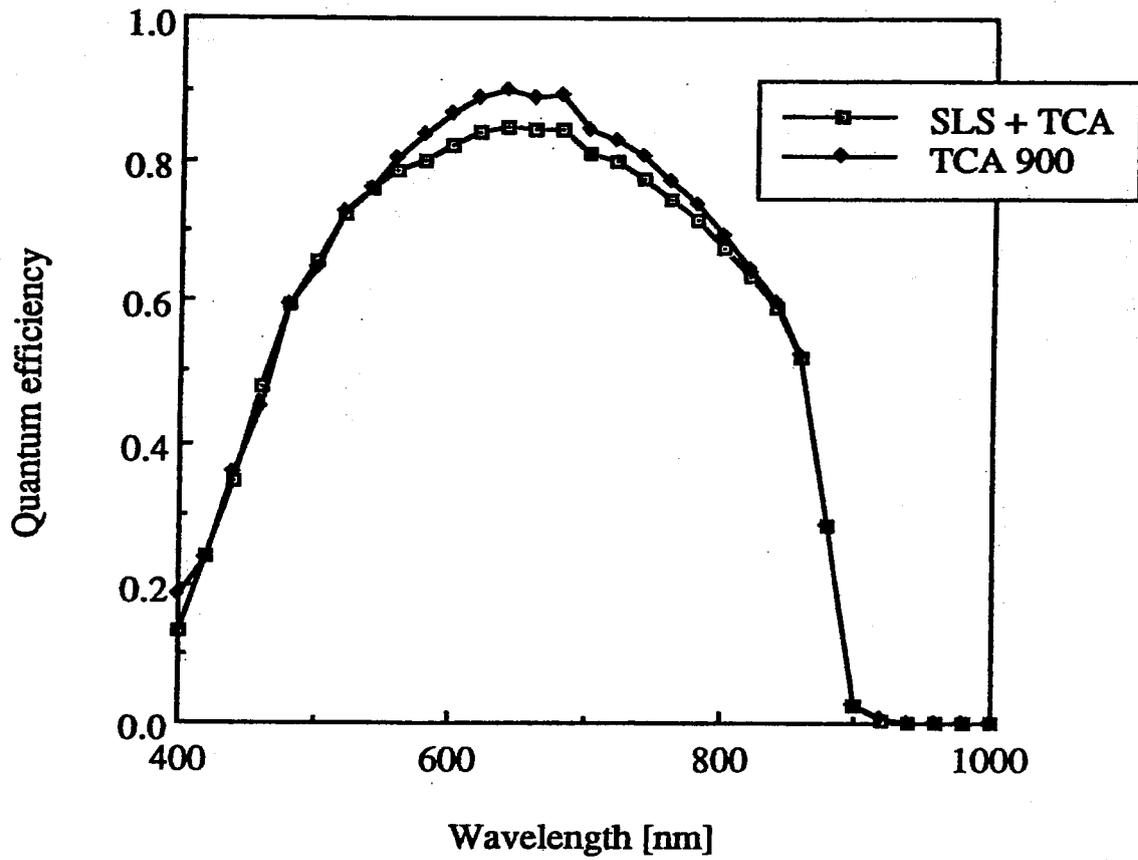


図 4.5: SLS を導入した Si 基板上 GaAs 太陽電池の量子効率

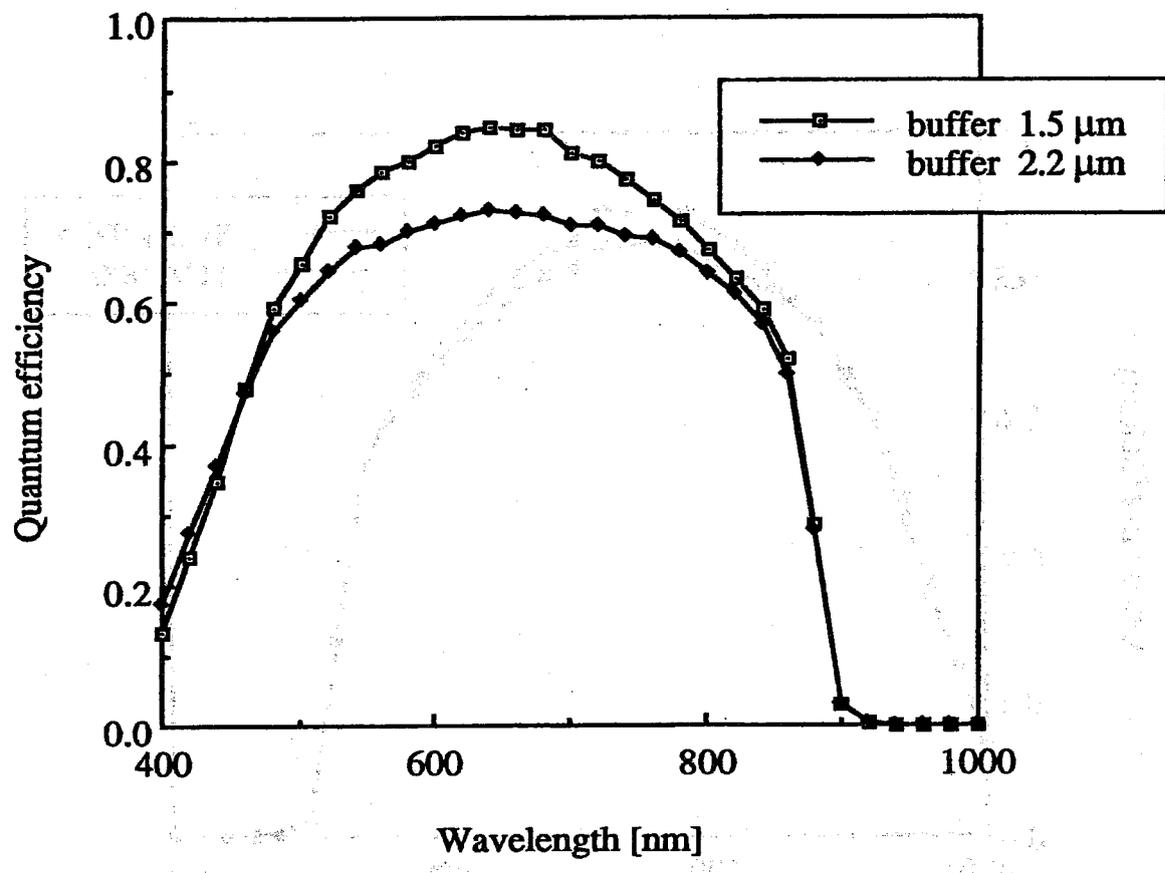
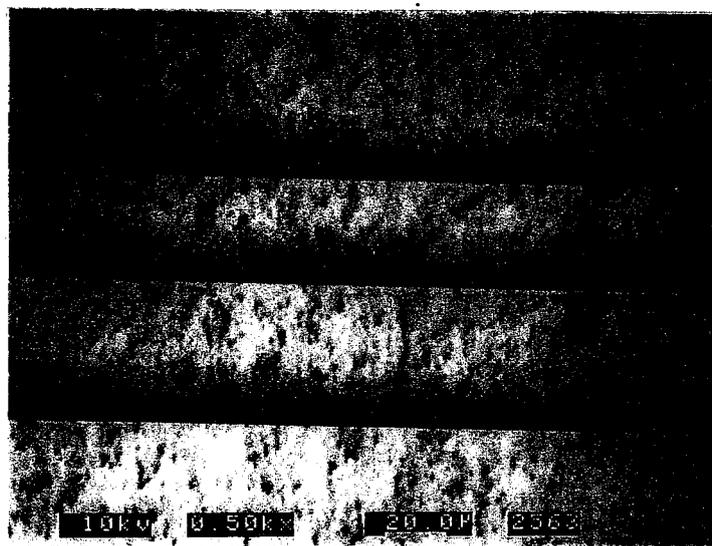


図 4.6: Buffer 層膜厚を増加させたことによる量子効率の変化

クラック



20 μm

図 4.7: Buffer 層膜厚を増加させた時の表面 EBIC 写真

4.6 まとめ

本章ではSi基板上GaAs太陽電池の高効率化を目指し、膜質の改善による特性改善を試みた。以下に本章で得られた結果をまとめる。

1. 前章で行った熱サイクルアニールによる転位低減技術を用いることによってSi基板上GaAs太陽電池を作製し、1000°Cで熱サイクルアニールをした太陽電池で開放電圧0.90 [V]、曲線因子78.3 [%]を得ることができ、変換効率についても16.7 [%] (AM0、1 sun、27°C)を得ることができた。
2. 前章でSLSを導入することで少数キャリアライフタイムの特性改善がなされた。この技術を用いてSi基板上GaAs太陽電池を試作した。太陽電池の特性は変換効率15.1 [%] (AM 0、1 sun、27°C)と前章での特性改善を生かした結果には至らなかった。また、膜厚の増加によるクラックによって変換効率向上には至らなかったが、SLSと光電変換層を十分離すことでSLSによる影響を緩和することができることがわかった。

参考文献

- [1] 浜川圭弘 桑野幸徳 共編, 太陽エネルギー工学培風館
- [2] M.Konagai and K.Takahashi, Solid State Electronics,19 (1976) p.119.
- [3] M.Umeno,T.Kato,T.Soga,T.Egawa and T.Jimbo, Proc.First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (1994) p.1679.
- [4] 大町, 「Si 及 SiO₂基板上の半導体結晶成長とデバイス応用に関する研究」名古屋工業大学博士論文, (1992)

第 5 章

GaAs/Si タンデム型太陽電池の特性評価

5.1 はじめに

AlGaAs や InGaP など 3 元混晶化合物半導体は禁制帯幅を自由に変えることができるためタンデム型太陽電池の材料に適している。さらに格子定数も自由に変えることができる 4 元混晶化合物半導体も研究されている [1]。3 元混晶半導体を用いた太陽電池ではすでに挙げたように InGaP₂/GaAs [2] や GaAs/InGaAs [4] などのタンデム型太陽電池で 30 % 以上の効率が得られるようになってきた。しかし、ボトムセルを Si とする AlGaAs/Si や GaAsP/Si、InGaP/Si などのタンデム型太陽電池はまだ研究の歴史が浅く AlGaAs/Si タンデム型太陽電池が近年 20 % の効率を越えたばかりである [5]。そこでこの章では、タンデム型太陽電池として 30 % を越えることを目標とし、第 3 章、第 4 章で最適化してきた Si 基板上 GaAs 層および Si 基板上 GaAs 層を用いた太陽電池の高効率化及び評価を行った。

5.2 Si ボトムセル及びタンデムセルの作成方法

Si 太陽電池は安価で割れにくいという特徴を生かし太陽電池材料として多く使用され、これまでその太陽電池の高効率化、高品質化のために多くの研究がなされてきた。しかし、タンデム型太陽電池のボトムセルとして使用する場合、これまで Si 太陽電池の高効率化のために養ってきた技術をそのまま応用することはできない。

そのため、本研究室では Si 基板表面への加工を避けスピノン拡散のみを用いて pn 接合の形成、Low-High 接合の形成を行った。その作製プロセスを図 5.1 に示す。

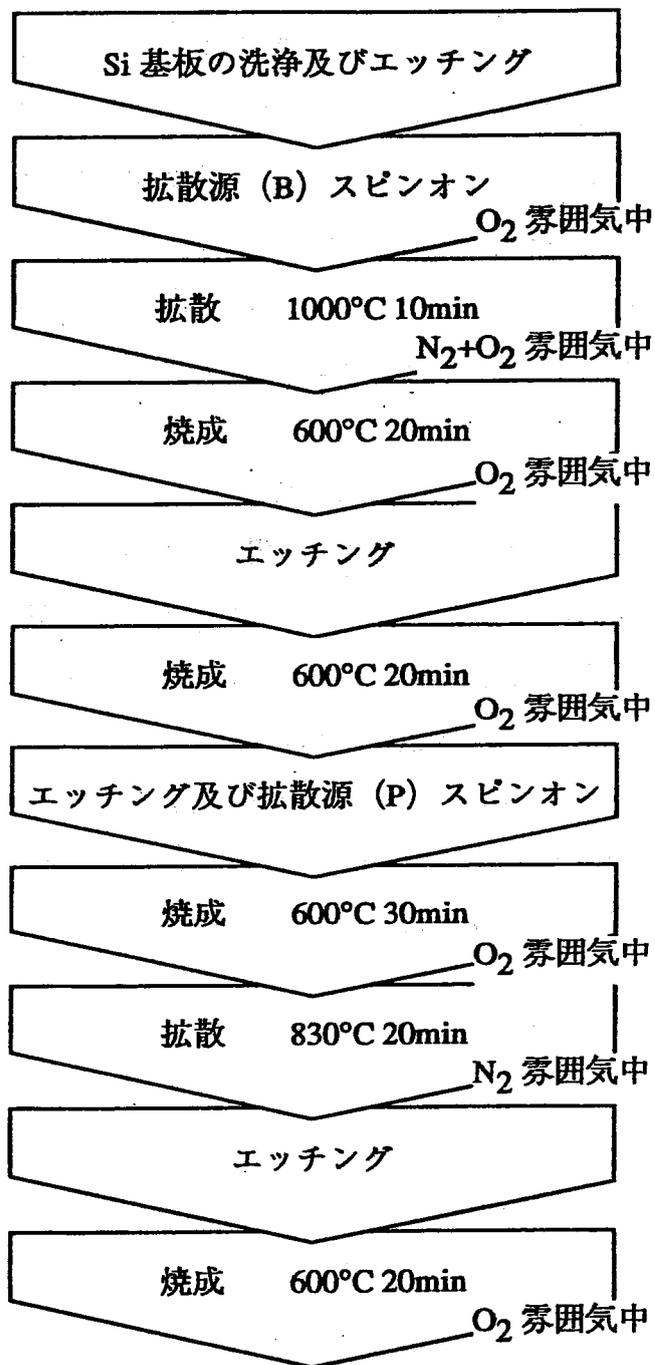


図 5.1: Si 下層太陽電池の作製プロセス

5.3 高抵抗 Si 基板を用いたタンデム型太陽電池の作製

本研究室では3端子出力型 GaAs/Si タンデム型太陽電池用のボトムセルの Si 基板には抵抗率 $1.5 \Omega\text{cm}$ のものを使用していたが以前本研究室において楊氏らにより Si 基板の抵抗率 $10 \Omega\text{cm}$ のものを使用した方がその長波長域の分光感度が向上することが報告されていた [6]。この分光感度特性と Si ボトムセルの変換効率の変化を図 5.2 と表 5-1 に示す。表からわかるように特に短絡電流密度の特性が向上した。また、分光感度特性から長波長域の変換効率の向上がうかがえる。これは高抵抗基板を用いることで少数キャリアライフタイムの特性が向上し従来取り出すことのできなかつた長波長域の光が変換した電流を取り出すことができたためである。

この様に長波長域において確かに分光感度特性が向上しており、吸収波長域 900 nm ほどの GaAs 太陽電池を上部セルとして用いた場合に期待がもてる。

本研究では従来の TCA (300°C から 900°C) を用いたタンデム型太陽電池においてこの Si ボトムセルを用いてその特性評価を行った。このタンデム型太陽電池の構造を図 5.3 に示す。また、このタンデム型太陽電池の諸特性を表 5-2 に示す。この様にタンデム型太陽電池にした場合も期待通りボトムセルの短絡電流値の特性が改善され全体としての変換効率が 3.9 % (AM0, 1 sun, 27°C) から 4.5 % に向上し、AM0, 1 sun, 27°C において 20.6 % と 20 % を越える効率を得ることができた。

表 5-1: 各抵抗率による Si 太陽電池の変換効率

AM0, 1 sun, 27°C, no ARC				
基板抵抗率	$J_{sc}[mA/cm^2]$	$V_{oc}[V]$	$FF[\%]$	$\eta[\%]$
1.5Ωcm	34.4	0.58	79.5	11.6
10Ωcm	37.3	0.56	77.1	11.9

表 5-2: 各タンデム型太陽電池の変換効率

AM0, 1 sun, 27°C					
		$J_{sc}[mA/cm^2]$	$V_{oc}[V]$	$FF[\%]$	$\eta[\%]$
Top cells	1.5Ωcm	33.9	0.85	75.0	16.0
	9.8Ωcm	32.6	0.88	75.7	16.1
Bottom cells	1.5Ωcm	13.7	0.52	74.0	3.9
	9.8Ωcm	15.0	0.52	78.3	4.5
Tandem cells	1.5Ωcm				19.9
	9.8Ωcm				20.6

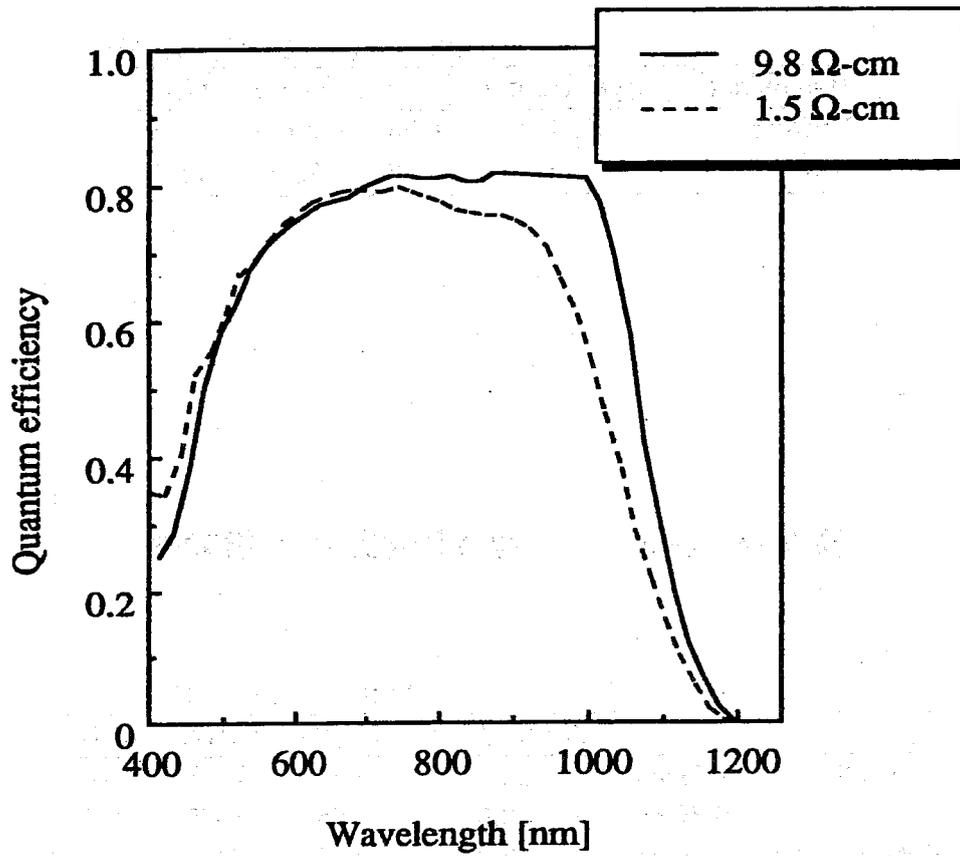


図 5.2: Si 基板の抵抗率を変化させたときの分光感度特性

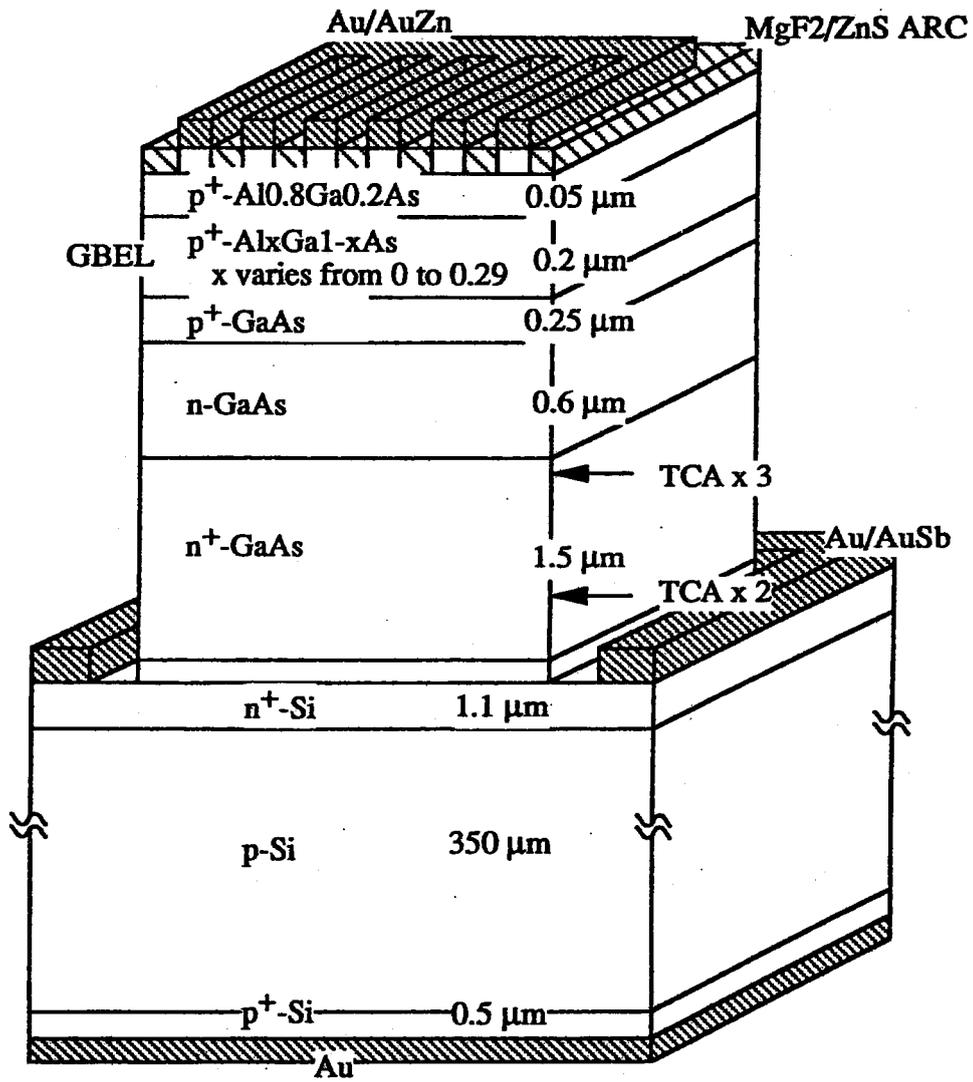


図 5.3: GaAs/Si タンデム型太陽電池の構造

5.4 SLS を導入したタンデム型太陽電池の試作

第 3.5 節、第 4.5 節において SLS を導入することによる GaAs エピタキシャル層への影響や GaAs 太陽電池の特性について議論した。SLS を導入した GaAs 太陽電池を GaAs/Si タンデム型太陽電池に採用した場合 SLS に用いられている InGaAs 層の高い吸収係数による長波長域の光の吸収による Si ボトムセルの実質的な変換効率の低下が懸念される。ここでは SLS を含むタンデム型太陽電池を試作し評価を行った。

図 5.4 に SLS を含む太陽電池の構造を示す。太陽電池の構造は Si 基板上 GaAs 太陽電池と同様に SLS を成長した後 $0.3\mu\text{m}$ GaAs を成長し、その上に光電変換層を形成した。この SLS を含むタンデム型太陽電池の分光感度特性と諸特性をそれぞれ図 5.5 と表 5-3 に示す。トップセルにおいて分光感度特性が悪くなっているのは第 4.5 節で述べたミスフィット転位の影響であると考えられる。しかし、Si ボトムセルにおいては表からもわかるように InGaAs による影響が懸念された短絡電流密度は TCA だけの試料と比べてあまり変化がなく変換効率にもその影響はみられなかった。結局、タンデム型太陽電池型としての変換効率は 19.5 % となり、TCA のみの試料に比べて低い値となったが、SLS を含んだ GaAs 太陽電池は GaAs/Si タンデム型太陽電池に応用することが十分可能であることがわかった。

表 5-3: 各タンデム型太陽電池の変換効率

		AM0, 1 sun, 27°C			
		$J_{sc}[\text{mA}/\text{cm}^2]$	$V_{oc}[\text{V}]$	$FF[\%]$	$\eta[\%]$
Top cells	TCA	32.6	0.88	75.7	16.1
	SLS + TCA	32.2	0.85	74.9	15.1
Bottom cells	TCA	14.8	0.52	78.3	4.5
	SLS + TCA	15.0	0.52	75.9	4.4
Tandem cells	TCA				20.6
	SLS + TCA				19.5

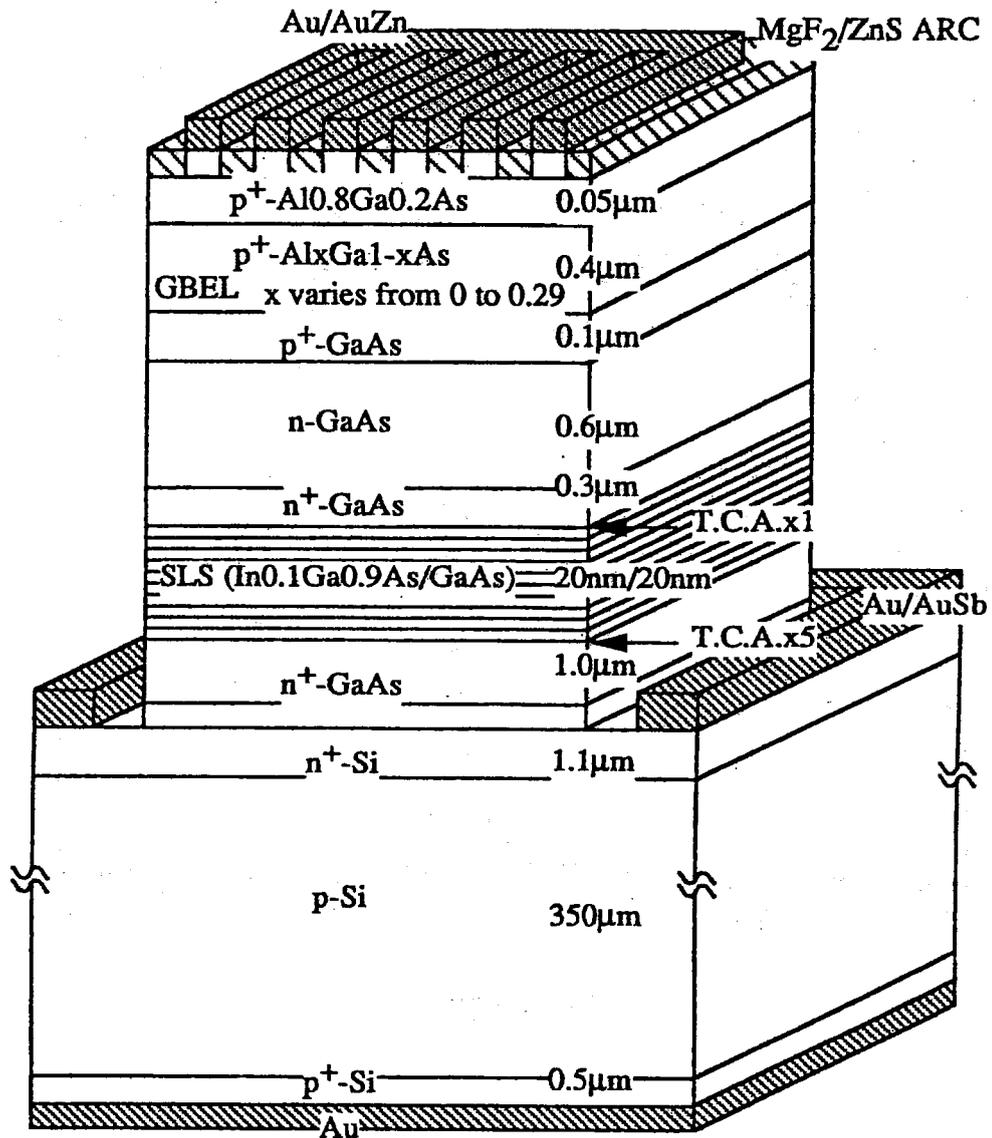


図 5.4: GaAs/SLS/Si タンデム型太陽電池の構造

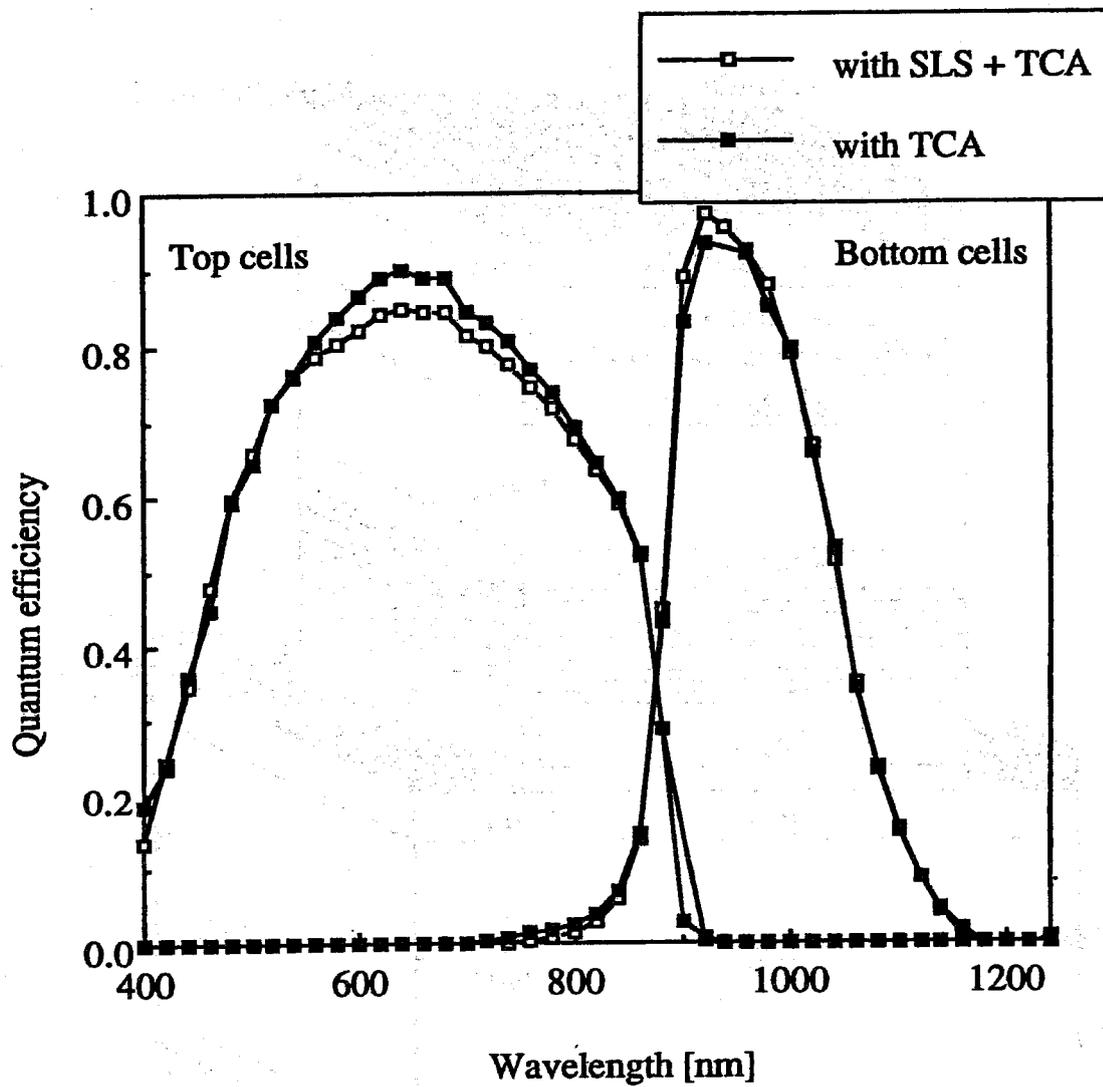


図 5.5: GaAs/SLS/Si タンデム型太陽電池の分光感度特性

5.5 高温熱サイクルアニールによるタンデム型太陽電池の特性向上

第 3.4 節、第 4.4 節において Si 基板上 GaAs エピタキシャル層において熱サイクルアニールがいかに効果的かを示した。ここではその技術を用いることによって GaAs/Si タンデム型太陽電池の特性向上を目指した。

太陽電池の構造は図 5.3 に示した通りである。また、熱サイクルアニールは第 4.4 節で最も特性が向上した 300°C から 1000°C とした。さらに、今回作製した太陽電池は反射防止膜の膜厚が最適化されており [7]、また、蒸着した表面電極は従来のものより細い電極にした。この太陽電池の諸特性を表 5-4 に示す。期待通りに開放電圧と曲線因子の特性が向上しているのに加え、短絡電流密度の特性も向上している。これは反射防止膜の膜厚最適の効果の現れではないかと思われる。図 5.7 に分光感度特性、図 5.6 に J-V 特性を示す。分光感度特性によって GaAs 吸収域において全体的に変換効率が向上していることが分かる。しかし、ボトムセルの変換効率の値にはそれほど変化が見えないがこの分光感度特性によって長波長域での特性の悪化がうかがえる。これは高温でアニールすることによって拡散によって形成した Si 太陽電池の裏面電界層 (back surface field ; BSF) の拡散が更に行われたために接合深さが変化したため、もしくは拡散濃度の変化によりその効果が薄れたためではないかと考えることが出来る。表 5-4 から、曲線因子の悪化もうかがえ pn 接合にも何らかの影響があったとも考えられる。これについては今後検討し、仮に熱サイクルアニールの影響があるならばそれを考慮した拡散条件の再検討が必要となるであろう。

上記の結果より Si 基板上 GaAs 太陽電池としては本研究室最高の 17.7 % を得ることができた。これは世界最高効率の 19.2 % [8] にはまだおよばないが、今後この効率を越える事を期待する。また、Si ボトムセルにおいて 4.4 % の効率がでており、全体として GaAs/Si タンデム型太陽電池の変換効率は 22.1% (AM0, 1 sun, 27°C) を得ることができた。

表 5-4: 各タンデム型太陽電池の変換効率

		AM0, 1 sun, 27°C			
		J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [V]	FF [%]	η [%]
Top cells	TCA 900°C	32.6	0.88	75.7	16.1
	TCA 1000°C	34.8	0.90	76.8	17.7
Bottom cells	TCA 900°C	14.8	0.52	78.3	4.5
	TCA 1000°C	15.0	0.52	77.2	4.4
Tandem cells	TCA 900°C				20.6
	TCA 1000°C				22.1

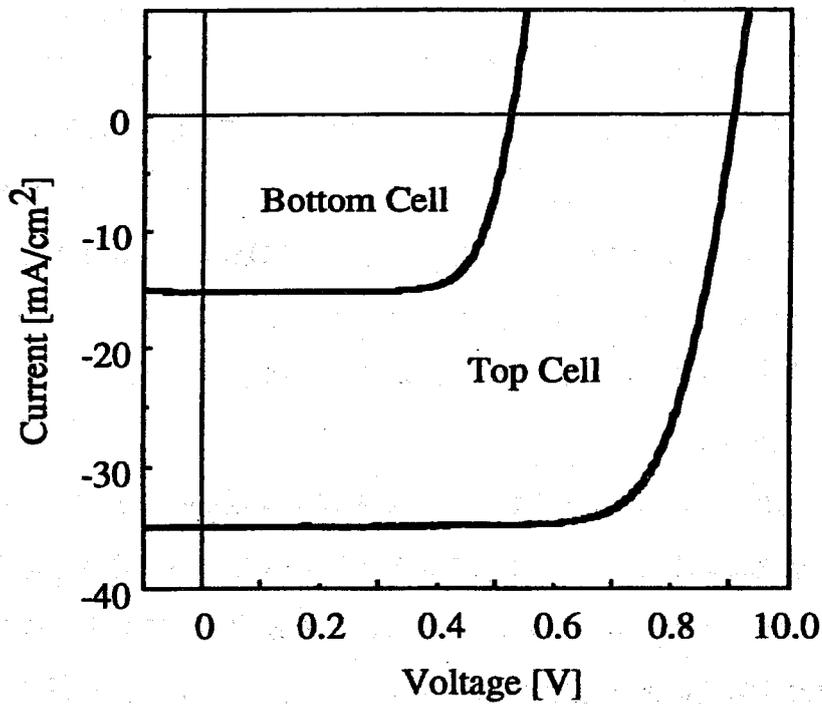


図 5.6: GaAs/Si タンデム型太陽電池の J-V 特性

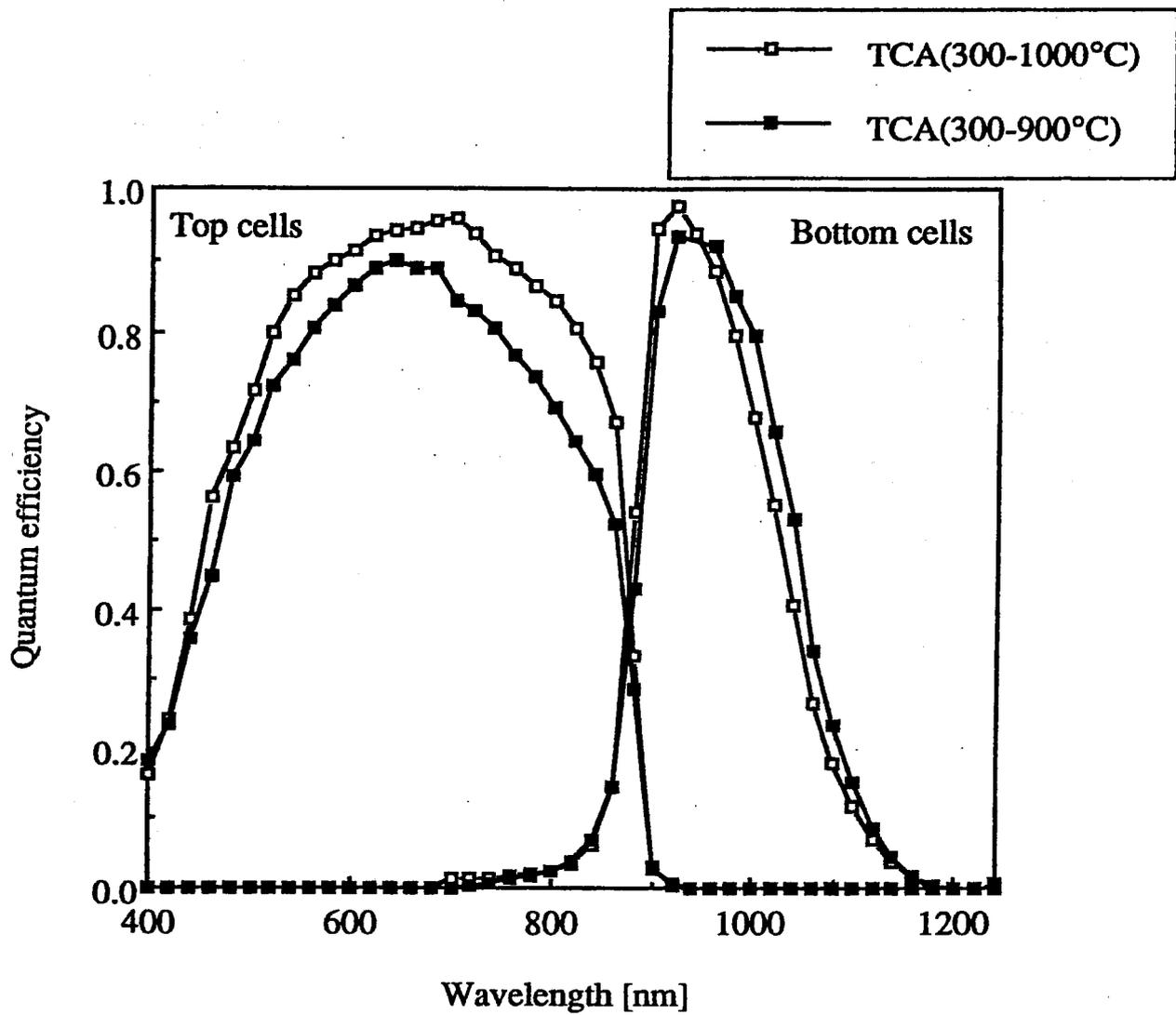


図 5.7: GaAs/Si タンデム型太陽電池の分光感度特性

5.6 まとめ

GaAs/Si タンデム型太陽電池を作製し、その特性を評価した。以下にその結果を記す。

1. 高抵抗 Si 基板をボトムセルに用いる事により長波長感度の特性が向上することを確認する事が出来た。また、それを用いてタンデム型太陽電池を作製する事によって変換効率 20.6 % (AM0、1 sun、27°C) を得る事ができた。
2. SLS を導入したタンデム型太陽電池の試作を行った。SLS のボトムセルへの影響はなく変換効率 19.5 % (AM0、1 sun、27°C) を得た。
3. 高温熱サイクルアニールと最適な反射防止膜を採用する事によってトップセルの特性が向上し変換効率 17.7 % (AM0、1 sun、27°C) を得る事ができた。また、タンデム型太陽電池としても変換効率 22.1 % (AM0、1 sun、27°C) を得る事ができた。

参考文献

- [1] P.R.Sharps et.al., "Development of 20 % efficient GaInAsP solar cells," Proc.23th IEEE PVSC,p.633,1993.
- [2] M.Omori and T.Takamoto, Dig.9th Int.PVSEC,(Miyazaki,Japan,1996),p.121.
- [3] B-C.Chung,G.F.Virshup and J.C.Shultz, Proc. 21st IEEE Photovoltaic Specialist Conference,(1990),p.179.
- [4] H.Matsubara et. al, Dig.9th Int.PVSEC,(Miyazaki,Japan,1996),p.533.
- [5] M.Umeno,T.Kato,T.Egawa,T.Soga and T.Jimbo, 13th EC PVSC,(1995)
- [6] 楊 民挙, 「Studies of High Efficiency $Al_xGa_{1-x}As/Si$ Tandem Solar Cells Grown by MOCVD」 名古屋工業大学博士論文, (1995)
- [7] 森 貞之, 「InGaP/Si タンデム型太陽電池に関する研究」 名古屋工業大学修士論文, (1997)
- [8] H.Okamoto et. al,
Proc. 20th IEEE Photovoltaic Specialist Conference,(1988),p.475.

第6章

総括

タンデム型太陽電池は理論変換効率 30 % を越える太陽電池として注目を浴びている。本研究でも高い理論変換効率を得ることができる 3 端子出力型 GaAs/Si タンデム型太陽電池の高効率化を目指しその作製と評価を行った。3 端子出力型タンデム型太陽電池は個々の太陽電池の電流整合をとる必要性がなくそれぞれの太陽電池の変換効率を向上させることで高効率化につなげることができる。本研究では特に Si 基板上 GaAs エピタキシャル層の膜質改善を目指した。また、その技術を用いてタンデム型太陽電池を作製した。以下にその結果を記す。

1. 時間分解フォトルミネッセンスによる少数キャリア寿命の測定を行い 1000°C で熱サイクルアニールを行った Si 基板上 GaAs 層で $\tau_{PL} = 3.36 \text{ ns}$ (活性層厚 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $n = 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) を得ることができた。
2. 歪超格子層を挿入したもので時間分解フォトルミネッセンスによる少数キャリア寿命の測定を行い Si 基板上 GaAs 層で $\tau_{PL} = 2.92 \text{ ns}$ (活性層厚 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $n = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) を得ることができた。

以上は Si 基板上 GaAs ヘテロエピタキシャル層の膜質改善の為の研究である。以下にこの Si 基板上 GaAs ヘテロエピタキシャル層形成技術を用いて Si 基板上 GaAs 太陽電池、GaAs/Si タンデム型太陽電池を作製したのでその結果を記す。

1. 熱サイクルアニールによる転位低減技術を用いることによって Si 基板上 GaAs 太陽電池を作製し、1000°C で熱サイクルアニールをした太陽電池で開放電圧 0.90 [V]、曲線因子 78.3 [%] を得ることができ、変換効率についても 16.7 % (AM0、1 sun、27°C) を得ることができた。

2. SLS 層を導入した Si 基板上 GaAs 太陽電池を試作した。太陽電池の特性は変換効率 15.1 % (AM0, 1 sun, 27°C) と少数キャリアライフタイムの特性改善を生かした結果には至らなかった。また、膜厚の増加によってクラックが発生し変換効率向上には至らなかったが、SLS と光電変換層を十分離すことで SLS による影響を緩和することができることがわかった。
3. 高抵抗 Si 基板をボトムセルに用いる事により長波長感度の特性が向上することを確認することが出来た。また、それを用いてタンデム型太陽電池を作製する事によって変換効率 20.6 % (AM0, 1 sun, 27°C) を得る事ができた。
4. SLS を導入したタンデム型太陽電池の試作を行った。SLS のボトムセルへの影響はなく変換効率 19.5 % (AM0, 1 sun, 27°C) を得た。
5. 高温熱サイクルアニールと最適な反射防止膜を採用する事によってトップセルの特性が向上し変換効率 17.7 % (AM0, 1 sun, 27°C) を得る事ができた。また、タンデム型太陽電池としても変換効率 22.1 % (AM0, 1 sun, 27°C) を得ることができた。

以上のようにタンデム型太陽電池として 20 % 以上の高変換効率を得ることができた。また、Si 基板上 GaAs 太陽電池としての変換効率も 17.7 % (AM0, 1 sun, 27°C) を得ることができワールドレコードの 19.2 % の更新も夢ではなくなった。今後、諸々の問題を解決することで Si 基板上 GaAs 太陽電池、GaAs/Si 太陽電池においてそれぞれの変換効率が 20 %、30 % を越えることを期待する。これをもって本論文の総括とする。

今後の課題

本研究の最終的な目標は変換効率 30 % を越えることである。現在の変換効率は 20 % 前半に留まっているが Si 基板上 GaAs ヘテロエピタキシャル層の膜質改善、新しい太陽電池構造への試みなどによって目標達成が現実のものとなることは可能であると考えている。以下に現在 GaAs/Si タンデム型太陽電池の抱えている問題点を挙げる。これを解決することによって上記の目標が達成されるのに役立てば幸いである。

1. 転位密度低減のために

Si 基板上 GaAs ヘテロエピタキシャル層中には未だに多量の転位が存在している。転位は少数キャリア再結合の再結合中心として働くためこれを低減させることは直接高効率化につながるであろう。この転位低減の方法として熱サイクルアニールや歪超格子などが挙げられる。この中で歪超格子による転位への効果は本研究でも紹介したが、まだ、太陽電池への応用がうまくなされていない。今後、この歪超格子層が十分生かされる中間層の設計を行うことで高効率太陽電池への道が開けるはずである。

2. 深い準位の低減

GaAs、AlGaAs 中には多くの深い準位が存在している。先に述べた転位も深い準位を形成し少数キャリアの寿命を悪化させている。この深い準位を減らすには 2 つの方法が考えられる。1 つは深い準位を形成する原因をなくすことであり、即ちそれは転位低減であり、純粋な（不純物を含まない）結晶の形成である。前者は上で述べた技術であり、後者は原料ガスなどの問題にかかっており改善は困難である。従って、深い準位を形成する原因を除去するのは非常に困難であると考えられる。そこでもう 1 つの方法は存在する深い準位の再結合中心としての効果をなくすことである。これができれば飛躍的に変換効率は向上するであろう。この方法としては、まず深い準位の存在を正確に知るために深い準位を定量的に評価できるようにすることである。次に効果をなくす方法、いわゆる不活性化の方法はすでに本研究室でも行われている co-dope 技術や多結晶 Si など効果のあった水素による不活性化などがある。また、熱サイクルアニール時の Si のオートドーピングに

よる不活性化の効果も調べる必要があるであろう。これらの技術を駆使することで高効率化につなげていってほしい。

3. 太陽電池構造の改善

本研究では太陽電池構造には触れなかったが、太陽電池構造を最適化することでも変換効率向上がはかれるはずである。本研究で採用した太陽電池構造の中でGBELでは電界効果を高めるためバンドギャップの差を同じにしたままGBELそのものの厚さを薄くしたという経緯があるがそれにもなってエミッター層の膜厚も変化しているのでまだその膜厚について改善の余地があると思われる。また、Si ボトムセルについては裏側にpn接合を形成することでより長波長域の変換効率を向上させることができるはずである。そうした上でポイントコンタクトセルなどの構造を採用することで更なる変換効率の向上を目指してほしい。

