

第5章 GaN系面発光型レーザ構造の作製

5.1 はじめに

GaN系面発光レーザの実現には高反射率を有する2つの反射鏡と、反射鏡に挟まれた短い共振器が必要である^[1, 2]。GaN/AlGaN半導体多層膜反射鏡^[3-5]は結晶成長時に基板側反射鏡として形成できるため、共振器長を短くできるという利点を持っている。本研究室において、減圧成長GaN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N半導体多層膜反射鏡において30.5ペアで94%という高反射率を得ることができた。そこで、基板側反射鏡としてGaN/AlGaN半導体多層膜反射鏡を用い、成長層側反射鏡としてTiO₂/SiO₂誘電体多層膜反射鏡を用いた面発光型レーザ構造を作製した。ここで、図5-1に示すようにAを基板側反射鏡とし、Bを成長層側反射鏡とする。

5.2 GaN/AlGaN半導体多層膜反射鏡を有するLED

5.2.1 試料作製方法および実験

本実験では、GaN/AlGaN半導体多層膜反射鏡を有するLEDの特性を調べるため、多層膜反射鏡を用いなかった試料をリファレンスとして使用し、GaN/AlGaN半導体多層膜反射鏡の有無による諸特性の変化を調査した。多層膜反射鏡を用いなかった試料は、常圧MOCVD法によりサファイア基板の上にGaN緩衝層を約30nm堆積させた後、n-GaN ($\sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)を4 μm 、In_{0.01}Ga_{0.99}N/In_{0.13}Ga_{0.87}N (5nm/2nm)量子井戸を3周期、p-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nを20nm、p-GaN ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)を0.2 μm 成長させたLED構造である。多層膜反射鏡を用いた試料は、MOCVD法により、常圧にてGaN緩衝層を堆積させた後、GaNを500nm、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nを20nm成長する。ここで基板温度を成長温度に保ったままリアクタ内の圧力を100torrに降圧し100torrで安定した後、GaN/Al_{0.6}Ga_{0.4}Nからなる交互多層膜を30.5ペア成長した。その後基板温度を成長温度に保ったまま、リアクタ内の圧力を再び常圧に戻し前述と同じLED構造を成長したものである。電極にはn側、p側それぞれTi/Al/Ni/Au (16nm/70nm/12nm/60nm)、Au/Ni/Au (3nm/6nm/12nm)を用い、p側電極は半透明電極とした。また、p側パッド用電極としてNi/Au (12nm/60nm)を用いた。作製した試料の構造図を、図5-2に示す。

5.2.2 実験結果および考察

GaN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 30.5 ペア多層膜反射鏡の反射率測定結果を図 5-3 に示す。ここで反射率の測定には、図 5-2 に示した構造において GaN/AlGaN 多層膜反射鏡で成長を止めたものを使用した。図 5-3 に示すように、波長 423 nm において 93 % の高反射率が得られた。また、反射率が 80 % 以上得られる帯域幅は 15 nm であった。

作製した LED の順方向 I-V 特性を、図 5-4 に示す。図 5-4 より、注入電流 20 mA 時における直列抵抗は、多層膜反射鏡を用いた場合、用いなかった場合とも 63 Ω で、多層膜反射鏡の有無による変化はなかった。注入電流 20 mA 時における順方向バイアス電圧は、多層膜反射鏡を用いた場合 5.4 V, 用いなかった場合は 5.2 V となり、多層膜反射鏡の有無による変化はなかった。

多層膜反射鏡を用いた場合、用いなかった場合の注入電流 20 mA 時における LED の発光スペクトルを、それぞれ図 5-5, 5-6 に示す。図 5-6 より、発光ピーク波長は 426 nm であり、使用した GaN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 30.5 ペア多層膜反射鏡のピーク波長 423 nm に近い。また図 5-5, 5-6 より、多層膜反射鏡上に LED を形成することにより、モードがはっきりしていることがわかる。ここで、モード間隔 6.6 nm は GaN/AlGaN 30.5 ペア多層膜反射鏡と GaN 薄膜との境界と GaN 薄膜と空気間との境界間、4.3 μm の共振器長に相当するものである。このことから、多層膜反射鏡を用いたことにより、良好な共振器構造が得られていることがわかる。

次に作製した LED の I-L 特性を、図 5-7 に示す。図 5-7 に示すように注入電流 20 mA 時における発光強度は、多層膜反射鏡を用いた場合 46.6 μW, 用いなかった場合 21.9 μW となり、多層膜反射鏡を用いたことにより約 2.1 倍の発光強度の増加が見られた。

5.2.3 まとめ

GaN/AlGaN 半導体多層膜反射鏡を有する LED の特性を調べた。発光スペクトルでは、多層膜反射鏡と LED 表面との間に形成された共振器構造による、縦モードが確認された。さらに、I-L 特性より発光強度の増加が見られた。

次に、作製した LED の成長層側に TiO₂/SiO₂ 誘電体多層膜反射鏡を形成し、LED の特性を調べた。

5.3 GaN/AlGaN 半導体多層膜反射鏡、TiO₂/SiO₂ 誘電体多層膜反射鏡を用いた面発光型レーザ構造の作製

5.3.1 試料作製方法および実験

本実験では、5.2 項において作製した LED の成長層側に TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成し、2つの反射鏡を用いて共振器構造を作製した。作製した試料の構造図を、図 5-8 に示す。

5.3.2 実験結果および考察

作製した TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡の反射率測定結果を図 5-9 に示す。ここで、測定波長範囲において誘電体に吸収はないものとし透過率測定より見積もった。

GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった LED における注入電流 20 mA 時の発光スペクトルを、成長層側、基板側にて測定した場合をそれぞれ図 5-10, 5-11 に示す。また、GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いた LED における注入電流 20 mA 時の発光スペクトルを、成長層側、基板側にて測定した場合をそれぞれ図 5-12, 5-13 に示す。図 5-11, 5-13 から、成長層側に TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成することにより、基板側に光検出器を設置した発光スペクトルに共振のモードがはっきりと現れるようになった。また、それぞれのモード間隔には変化がない。

GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった LED における I-L 特性を、成長層側、基板側にて測定した場合をそれぞれ図 5-14, 5-15 に示す。また、GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いた LED における I-L 特性を、成長層側、基板側にて測定した場合をそれぞれ図 5-16, 5-17 に示す。また、GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった場合、用いた場合の注入電流 20 mA 時の発光強度を、それぞれ図 5-18, 5-19 に示す。注入電流 20 mA 時の発光強度、誘電体多層膜反射鏡有り/誘電体多層膜反射鏡無しの発光強度比を表 5-1 に示す。図 5-18, 5-19, 表 5-1 から、成長層側に TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成することにより発光強度は、GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった場合と用いた場合とで、それぞれ成長層側では 0.17 倍、0.09 倍と減少、基板側では 1.57 倍、1.86 倍と増加していることがわかる。これは、成長層側に形成した TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡により成長層側に放

出された光のほとんどが基板側に反射されたことによるものであると考える。

表 5-1 作製した LED の発光強度と発光強度比

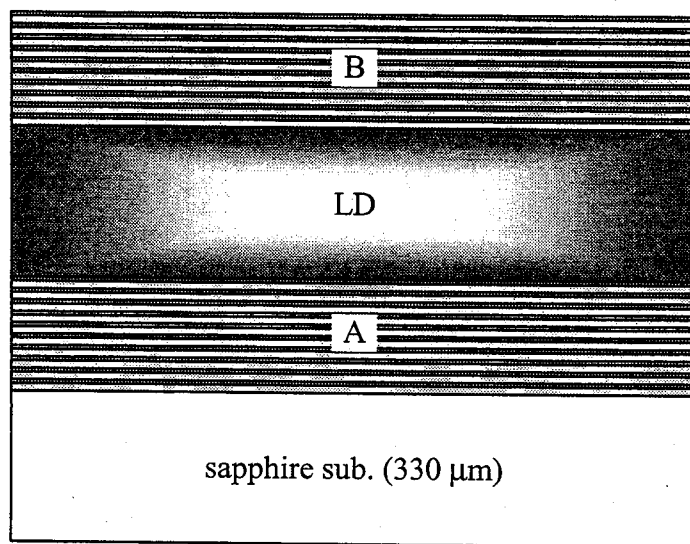
GaN/AlGaIn DBR	Output power (μW)					
	Detector : epi. side			Detector : sub. side		
	TiO ₂ /SiO ₂ DBR		ratio = (2)/(1)	TiO ₂ /SiO ₂ DBR		ratio = (2)/(1)
	(1) without	(2) with		(1) without	(2) with	
without	21.85	3.67	0.17	52.33	82.16	1.57
with	46.59	4.34	0.09	36.56	67.91	1.86

5.3.3 まとめ

GaN/AlGaIn 半導体多層膜反射鏡を用いなかった LED と、用いた LED の成長層側に TiO₂/SiO₂ 誘電体多層膜反射鏡を形成し、LED の特性変化を調べた。注入電流 20 mA 時の発光スペクトル特性より、モード間隔に変化がないことがわかった。また、I-L 特性より、発光強度は成長層側では減少、基板側では増加していることがわかった。基板側反射鏡として GaN/AlGaIn 30.5 ペア多層膜反射鏡を用い、成長層側反射鏡として TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を用いた LED にて基板側から発光スペクトルを測定した場合が最も縦モードがはっきりと現れた。これらの結果より基板側反射鏡の反射率をさらに向上させ、電流注入密度を大きくすれば GaN 系面発光レーザの電流注入による発振が可能であると考えられる。

第5章 参考文献

- [1] 伊賀健一, 小山二三男 共著: 面発光レーザの基礎と応用 (共立出版, 1999)
- [2] 伊賀健一, 小山二三男 共著: 面発光レーザ (オーム社, 1990)
- [3] T. Someya and Y. Arakawa, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3635 (1998)
- [4] T. Someya, K. Tachibana, J. Lee, T. Kamiya, and Y. Arakawa, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2* **37**, L1424 (1998)
- [5] H. P. D. Schenk, P. de Mierry, P. Venegues, O. Tottereau, M. Laugt, M. Vaille, E. Feltin, B. Beaumont, and P. Gibart, S. Fernandez and F. Calle, *Appl. Phys. Lett* **80**, 174 (2002)



A : 基板側反射鏡 B : 成長層側反射鏡

図 5-1 反射鏡構成図

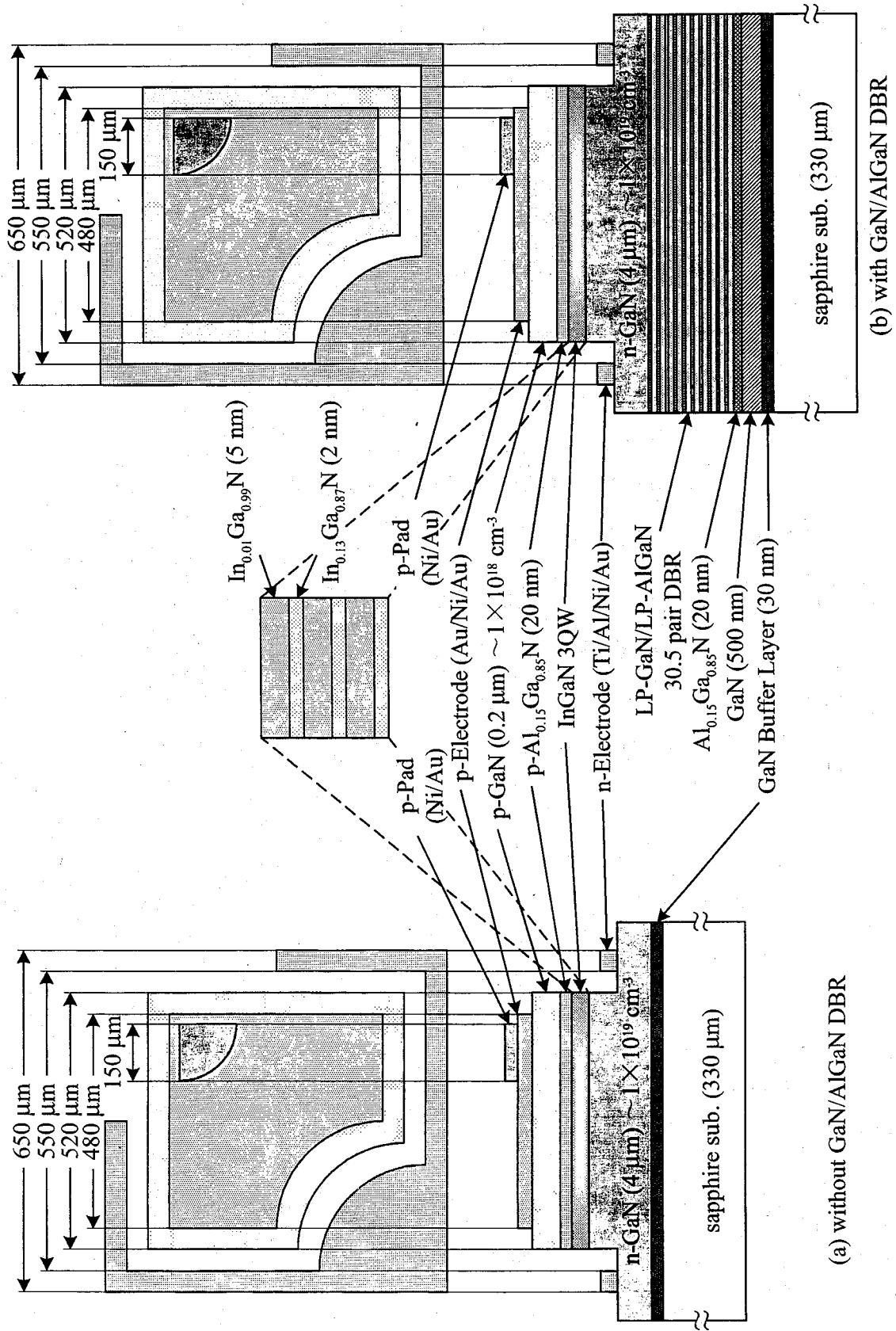


図 5-2 作製した試料の構造図

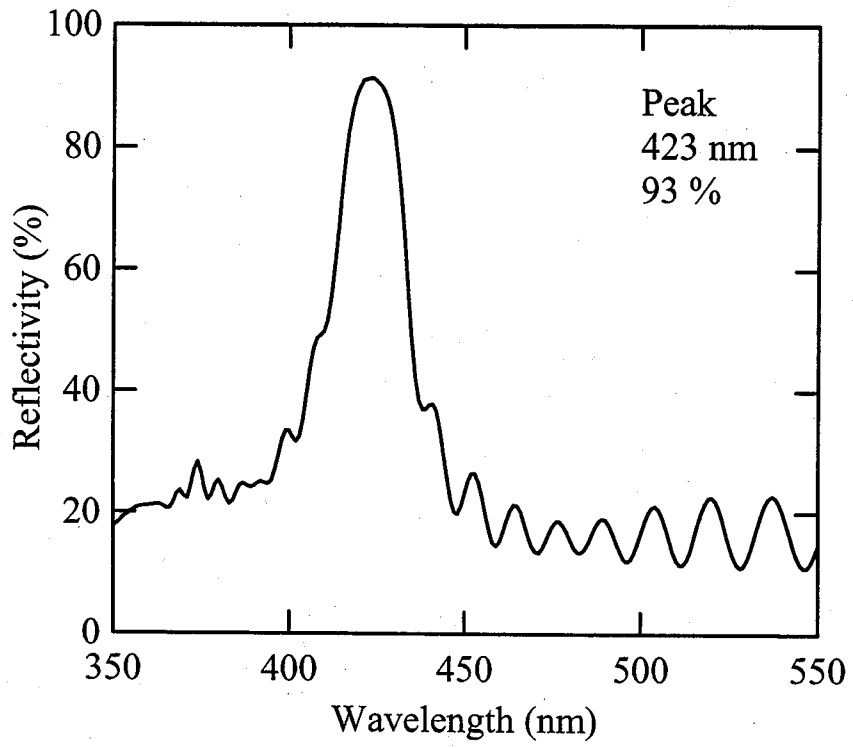


図 5-3 作製した GaN/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 30.5 ペア多層膜反射鏡の反射率測定結果

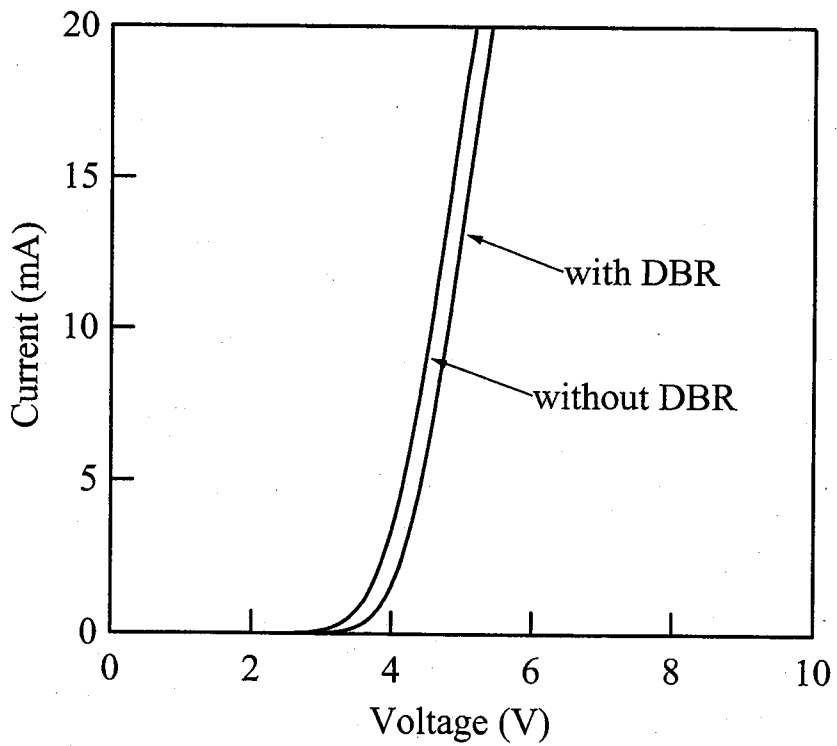


図 5-4 作製した LED の順方向 I-V 特性

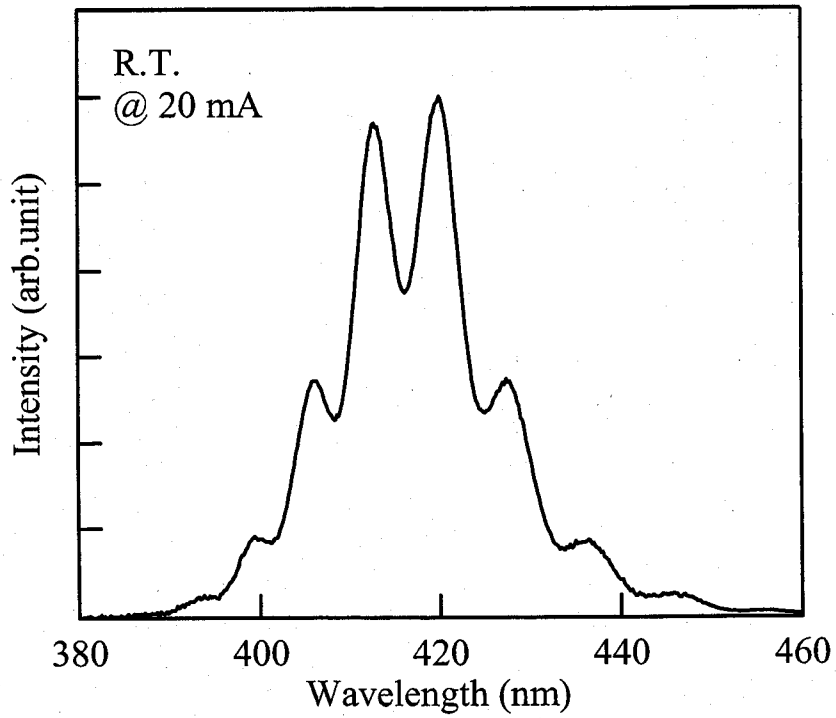


図 5-5 GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった LED の発光スペクトル
(注入電流 20 mA 時)

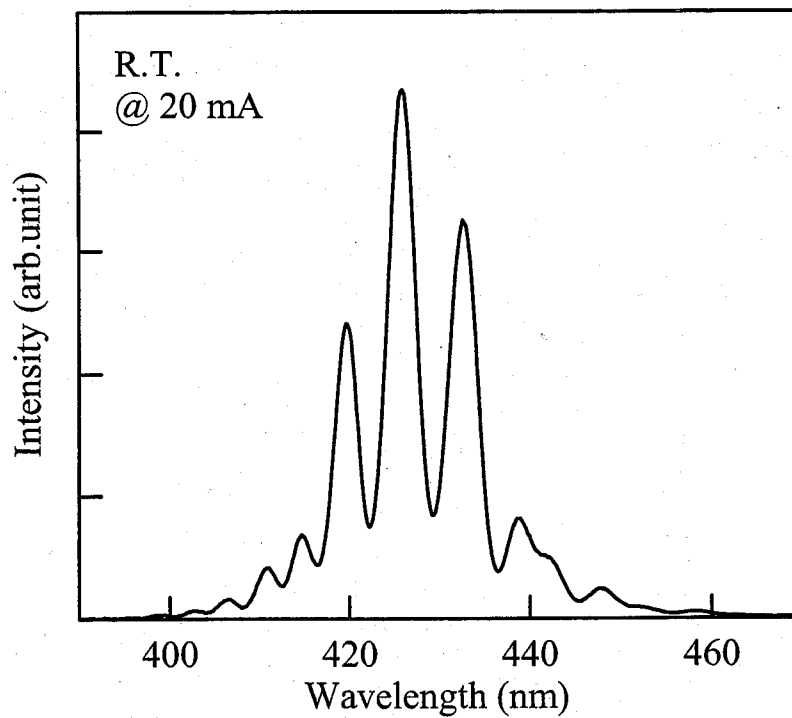


図 5-6 GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いた LED の発光スペクトル
(注入電流 20 mA 時)

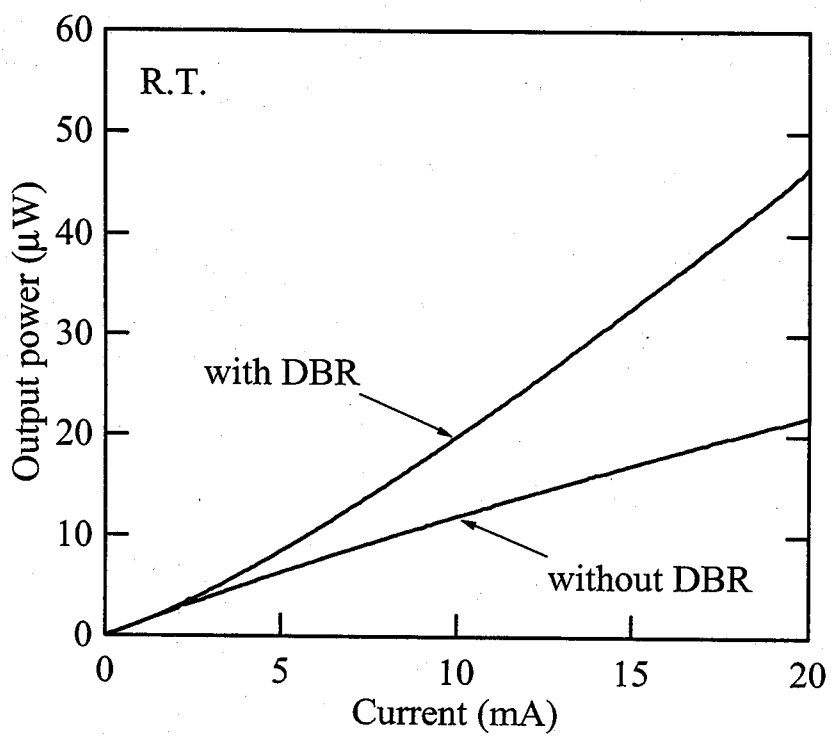
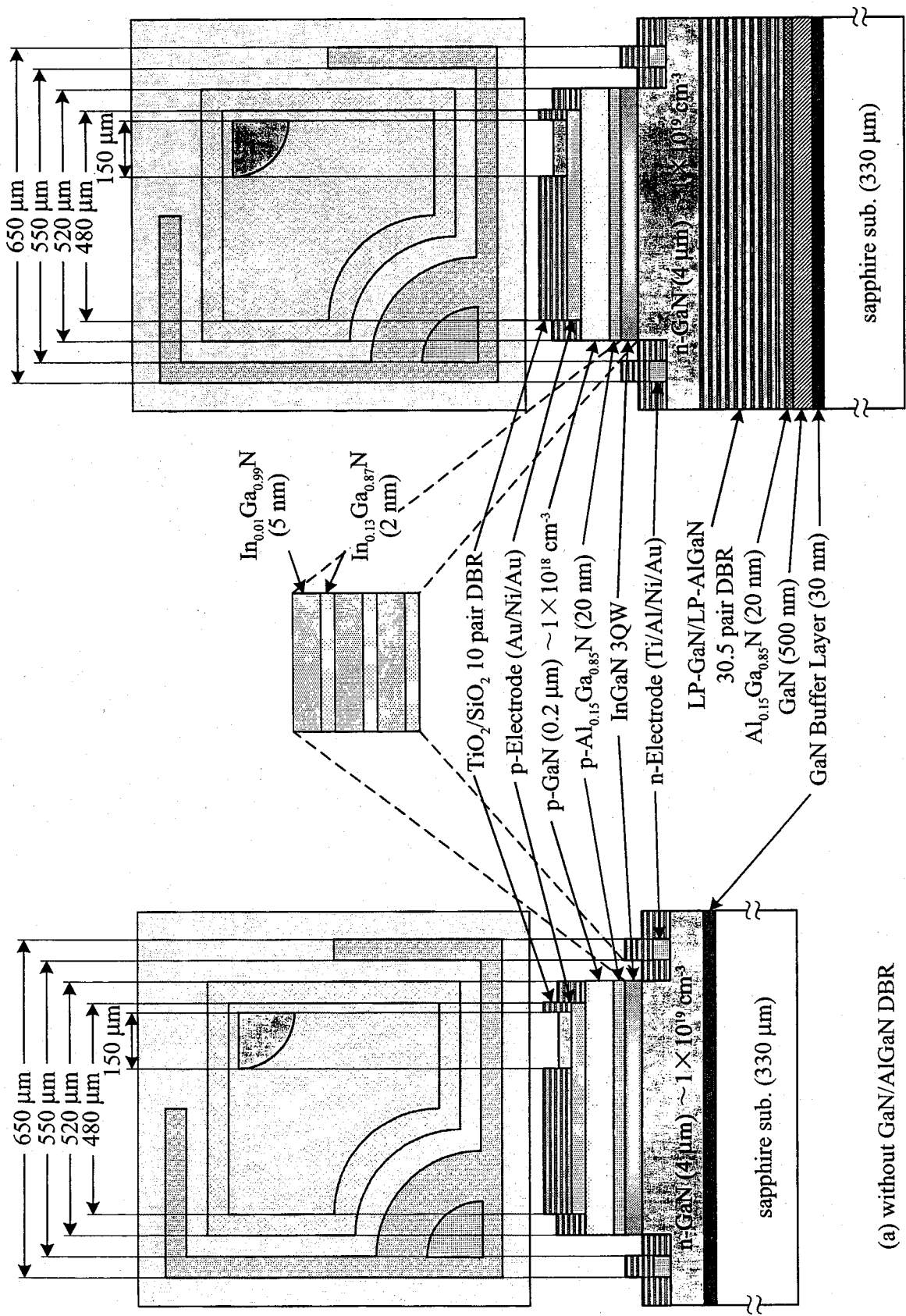


図 5-7 作製した LED の I-L 特性



(a) without GaN/AlGaN DBR

(b) with GaN/AlGaN DBR

図 5-8 作製した試料の構造図 (TiO₂/SiO₂ 10 pair DBR 有り)

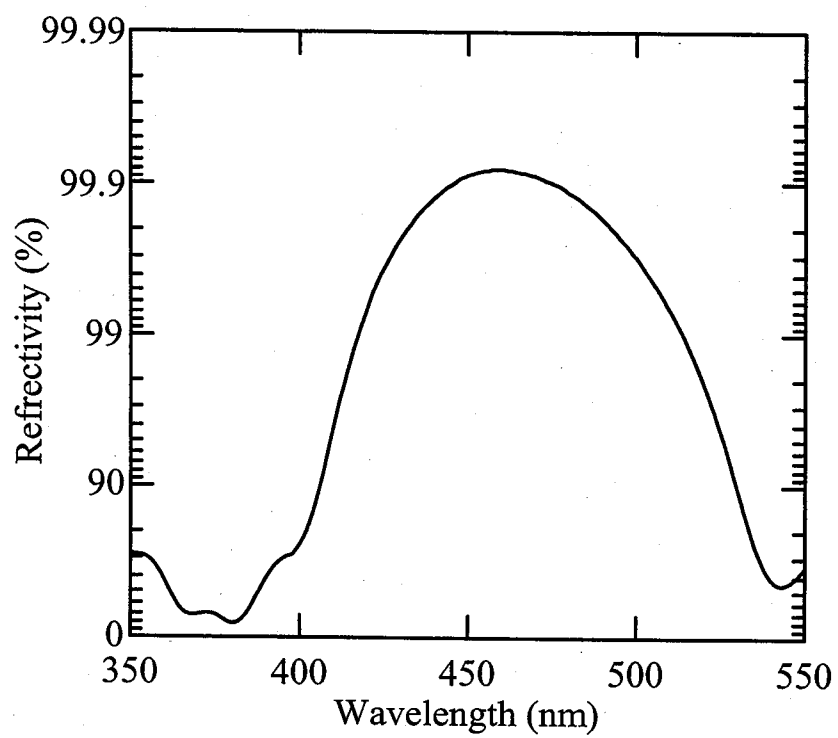


図 5-9 作製した $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡の反射率測定結果

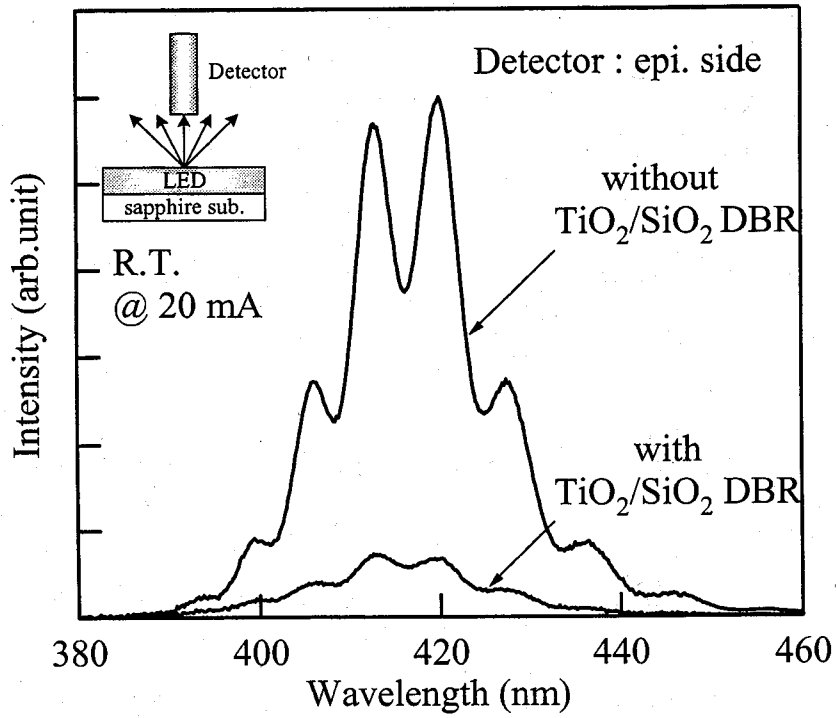


図 5-10 GaN/AlGaIn 多層膜反射鏡を用いなかった LED の発光スペクトル (@ 20 mA, 成長層側に光検出器)

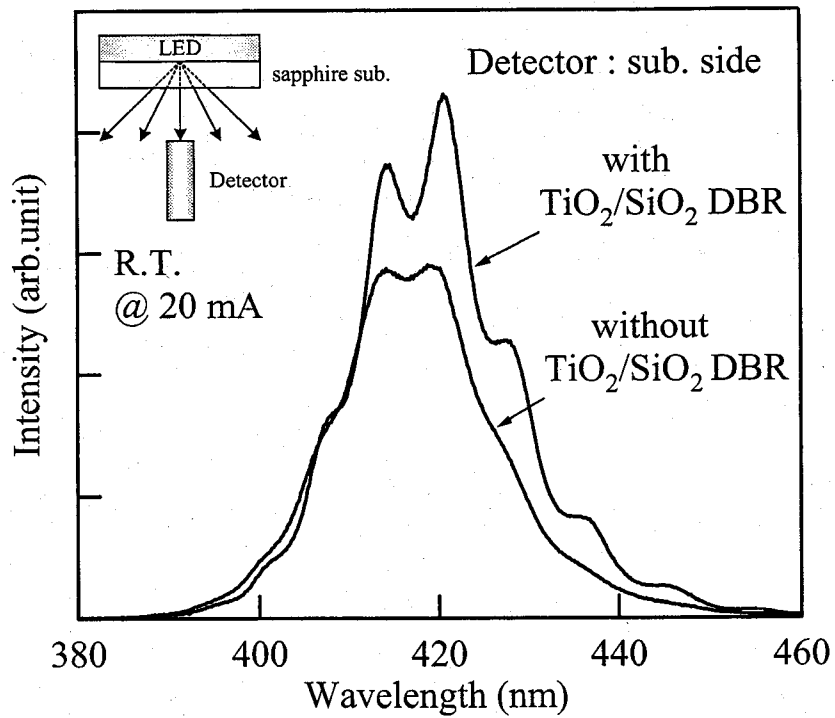


図 5-11 GaN/AlGaIn 多層膜反射鏡を用いなかった LED の発光スペクトル (@ 20 mA, 基板側に光検出器)

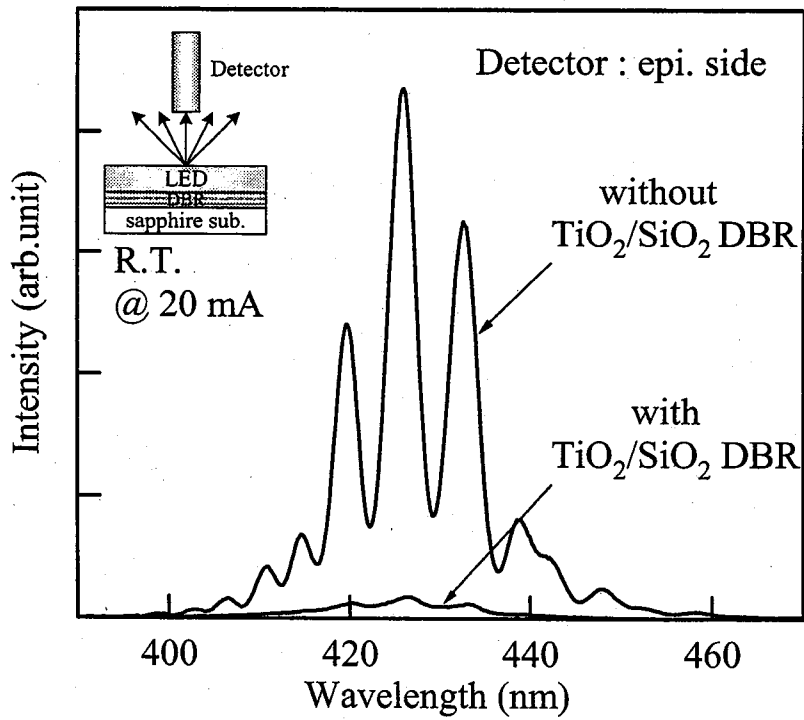


図 5-12 GaN/AlGaIn 多層膜反射鏡を有する LED の発光スペクトル
(@ 20 mA, 成長層側に光検出器)

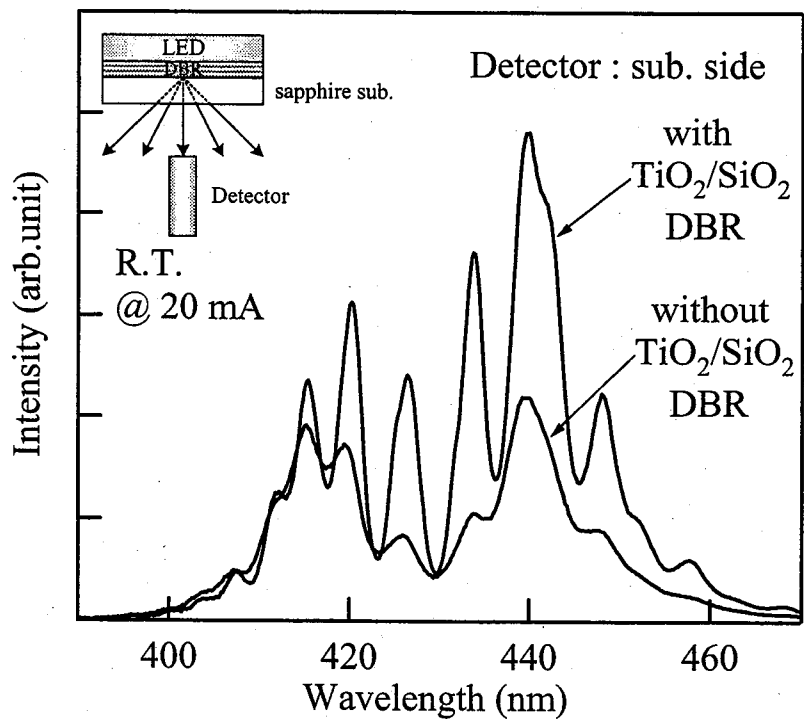


図 5-13 GaN/AlGaIn 多層膜反射鏡を有する LED の発光スペクトル
(@ 20 mA, 基板側に光検出器)

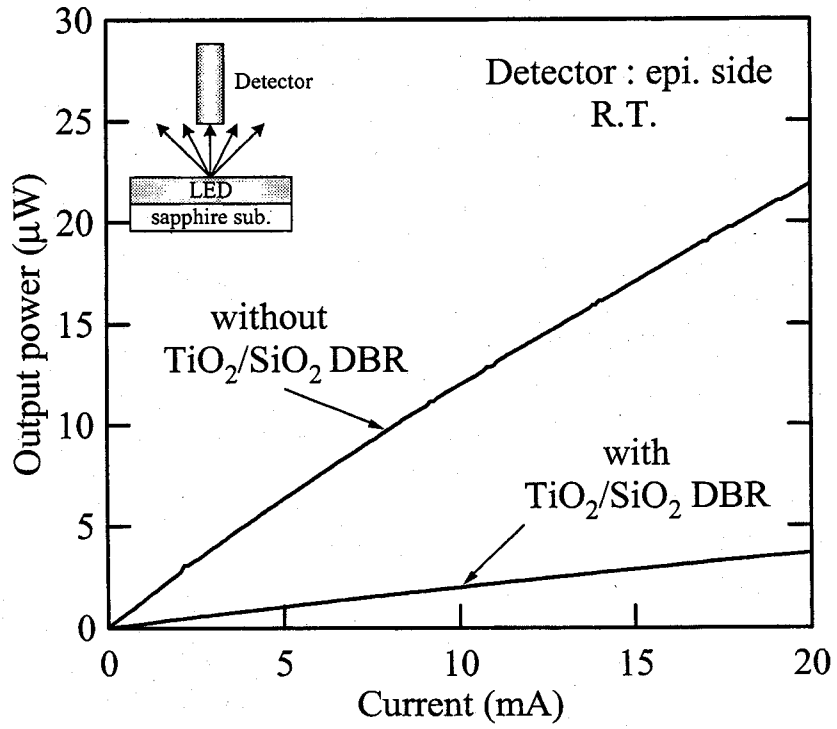


図 5-14 GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった LED の I-L 特性
(成長層側に光検出器)

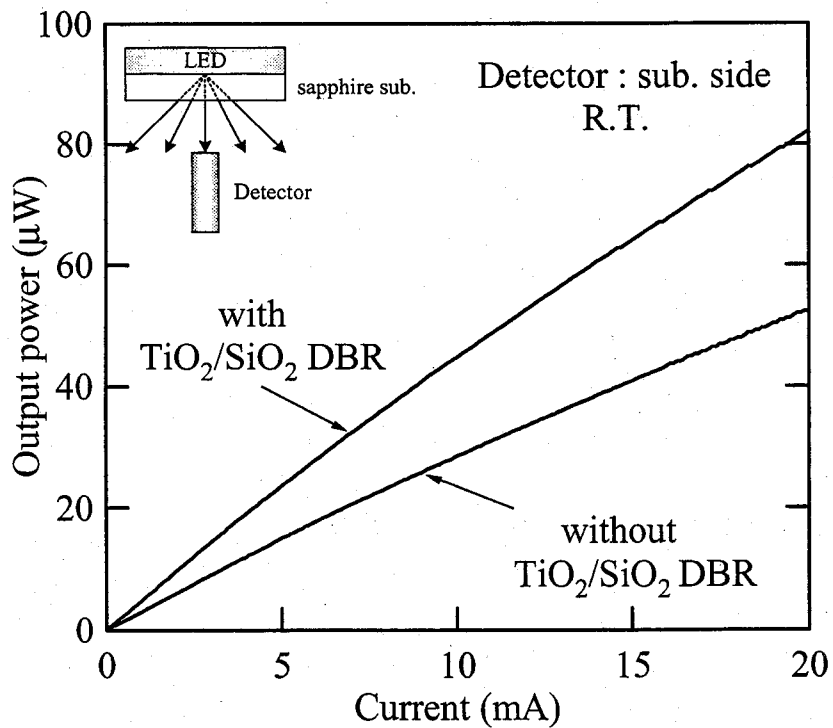


図 5-15 GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった LED の I-L 特性
(基板側に光検出器)

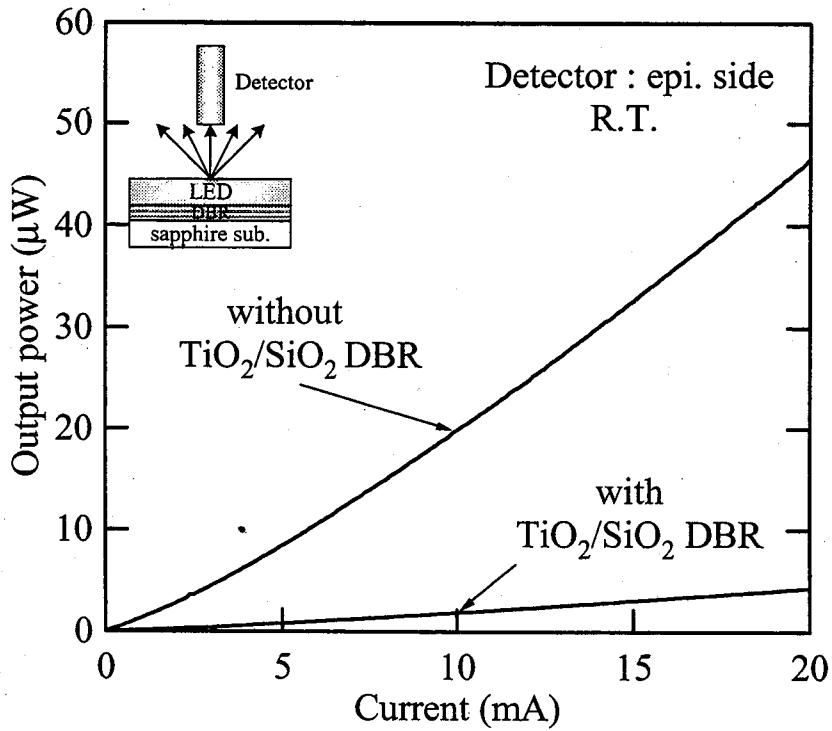


図 5-16 GaN/AlGaIn 多層膜反射鏡を有する LED の I-L 特性
(成長層側に光検出器)

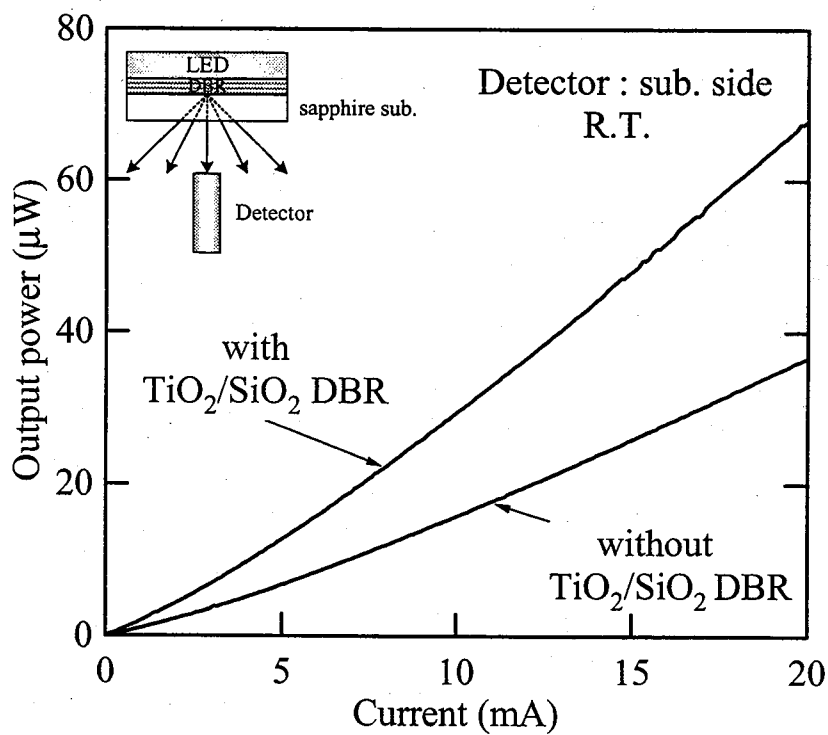


図 5-17 GaN/AlGaIn 多層膜反射鏡を有する LED の I-L 特性
(基板側に光検出器)

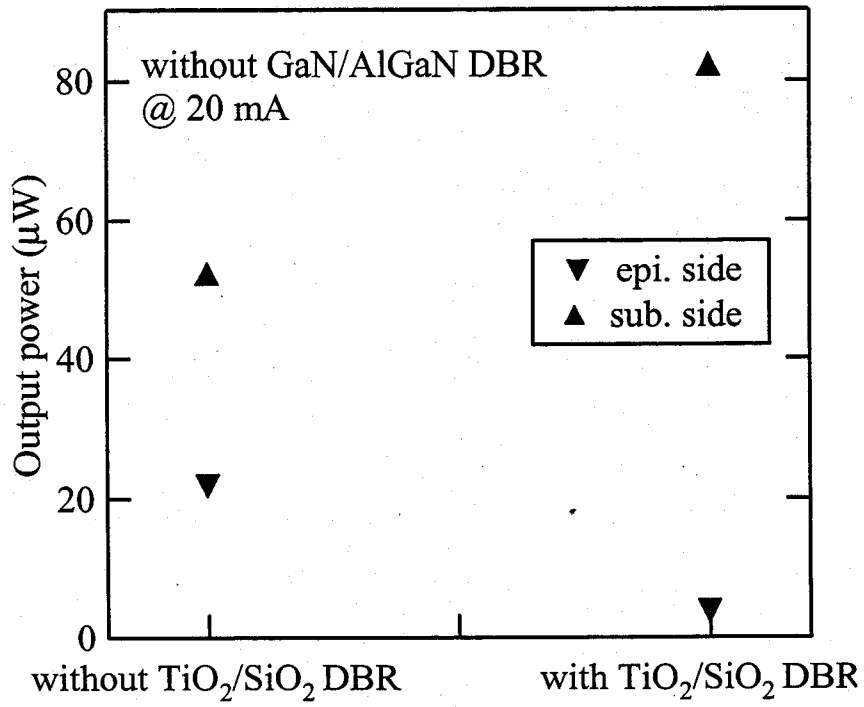


図 5-18 GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を用いなかった LED の
注入電流 20 mA 時の発光強度

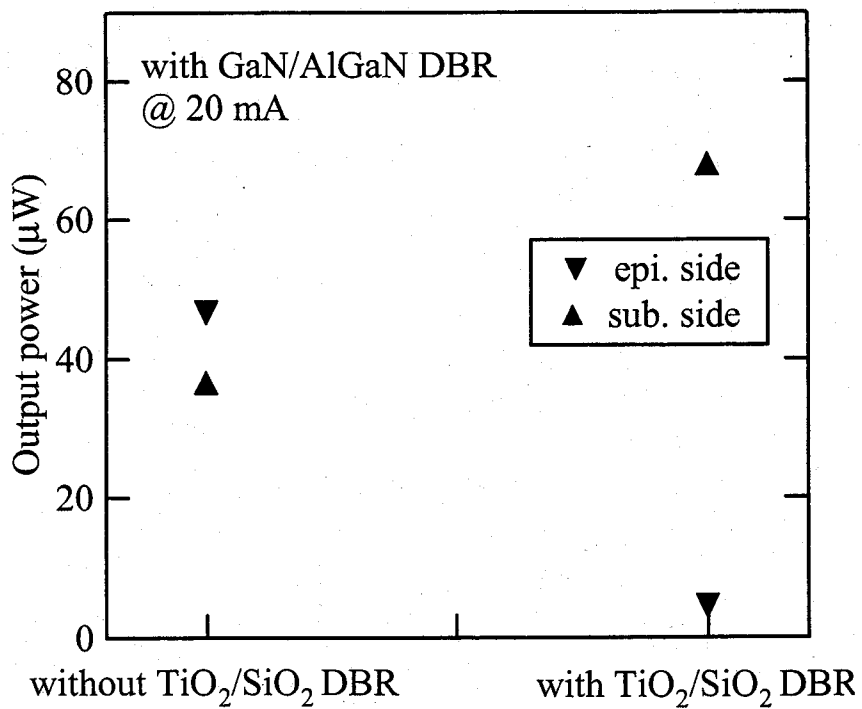


図 5-19 GaN/AlGaN 多層膜反射鏡を有する LED の
注入電流 20 mA 時の発光強度

第6章 総括

本研究では、GaN系面発光レーザの実現に向けてTiO₂、SiO₂を用いた誘電体多層膜反射鏡と、GaN系面発光型レーザ構造の作製および評価を行った。

TiO₂/SiO₂多層膜反射鏡を酸素導入反応性蒸着により作製し、10ペアで最高99.8%の反射率を得た。

このTiO₂/SiO₂多層膜反射鏡を基板裏面側反射鏡として用いるため、サファイア基板のエッチングを行った。RIE装置を用い、エッチングガス: BCl₃, エッチングチャンバー圧力: 5.0 Pa, RF出力: 150 W, ガス流量: 10 sccmの条件において3.39 μm/hourのエッチングレートを得た。エッチングしたサファイア基板裏面にTiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの発光スペクトルより、サファイア基板のエッチング前には現れなかったモードが観察された。このモードの間隔は4 nmであり、TiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡と成長層側空気間(約11 μm)を共振器として見積もったモード間隔の値とよく一致した。I-L特性より反射鏡を形成したことによる発光強度の増加を得ることはできなかった。これは、放熱性の悪化によるものであると考えられる。サファイア基板をエッチングし、サファイア基板裏面にTiO₂/SiO₂多層膜反射鏡を形成した後、放熱性のよい銅板等に固定することができれば、TiO₂/SiO₂多層膜反射鏡をGaN系面発光レーザの基板裏面側反射鏡として用いることができると考えている。

次に、基板側反射鏡としてGaN/AlGaIn半導体多層膜反射鏡を用い、成長層側反射鏡としてTiO₂/SiO₂誘電体多層膜反射鏡を用いた面発光型レーザ構造の作製を試みた。基板側反射鏡としてGaN/AlGaIn 30.5ペア多層膜反射鏡を用い、成長層側反射鏡としてTiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡を用いたLEDを作製した。基板側から測定した注入電流20 mA時の発光スペクトルは鋭い共振モードを示し、良好な共振器が作製できたものといえる。基板側反射鏡の反射率をさらに向上させ、電流注入密度を大きくすればGaN系面発光レーザの電流注入による発振が可能であると考えられる。