

第4章 サファイア基板をエッチングした

面発光型 InGaN LED

4.1 はじめに

本研究では、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 誘電体多層膜反射鏡において、10 ペアで 99.83 % という高反射率を得ることができた。通常、結晶成長時に用いるサファイア基板の厚さは $330\ \mu\text{m}$ と厚く、基板裏面と成長層面に反射鏡を作製し、共振器構造を形成した場合、サファイア基板を介すことにより共振器長が長くなり光の損失が多くなる。 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 誘電体多層膜反射鏡を面発光レーザの基板側反射鏡に用い、微小共振器構造を形成するには次の2つの方法が考えられる。

- ① 埋め込み再成長
- ② 結晶成長後、基板を剥離または薄化

本研究では、結晶成長後の加工による手法に着目した。この方法としては、サファイア基板の剥離や、研磨、エッチングなどが考えられる。サファイア基板と GaN 薄膜との剥離方法としては、エキシマレーザを用いたレーザリフトオフ法が報告されている^[1-7]。レーザリフトオフ法とは、サファイア基板側からエキシマレーザを入射し、GaN 薄膜にレーザ光を吸収させることによりサファイア基板と GaN 薄膜とを剥離するものである。しかし、剥離時に GaN 薄膜にクラックが発生し、クラックのない面積が $1\ \text{mm}^2$ しか得られなかった。また、研磨ではハンドリングのできるサファイア基板の厚さは、 $80\ \mu\text{m}$ が限界であり、微小共振器の形成には不十分であった。そこで、本研究では RIE(Reactive Ion Etching) を用いてサファイア基板をエッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 誘電体多層膜反射鏡を用いて面発光型 LED を作製した。

4.2 サファイア基板のエッチングレートとエッチング後の表面観察

サファイア基板のエッチングレートの算出、およびエッチング後のサファイア基板の表面粗さを調べるため表面観察を行った。

4.2.1 試料作製方法および実験

サファイア基板を 300 μm に研磨し、Si 基板(厚さ約 200 μm)を用いてエッチング用マスクパターンを形成した。そして、サファイア基板のエッチングレートを調べるため、エッチング時間を 12, 18, 24, 27 hour と変化させた。ここで、RIE におけるエッチング条件は、エッチングガス: BCl_3 , 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 とし、1 回のエッチング時間を 3 hour とした。

4.2.2 実験結果および考察

RIE を用いてエッチングを行ったサファイア基板のエッチング時間と深さとの関係を図 4-1, 表 4-1 に示す。図 4-1 に示すようにエッチングレートは 3.39 $\mu\text{m}/\text{hour}$ であった。

表 4-1 エッチング時間と深さ、サファイア基板の厚さ

Etching time (hour)	Etching depth (μm)
12	40.7
18	61.1
24	81.5
27	91.6

次に、AFM を用いて RIE によりエッチングしたサファイア基板の表面観察を行った。研磨のみ、12, 18, 24, 27 hour エッチングを行ったサファイア基板の AFM 像を、それぞれ図 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6 に示し、AFM 測定より得られた P-V (山谷の最大高低差), Rms(二乗平均面粗さ)とエッチング時間との関係を図 4-7, 表 4-2 に示す。ここで、エッチング時間 0 は、研磨直後のサファイア基板である。図 4-7 よりエッチング時間の増加とともに、エッチング後のサファイア基板表面の平坦性が向上していることがわかる。このことより、エッチング後のサファイア基板上に反射鏡を形成しても、サファイア基板と反射鏡との界面において光の損失は少なく、高反射率が得られるといえる。

表 4-2 エッチング時間と AFM 像より得られた P-V, Rms

Etching time (hour)	scan area			
	5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$		1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$	
	P-V (nm)	Rms (nm)	P-V (nm)	Rms (nm)
0	50.00	5.33	14.41	2.21
12	17.91	3.09	6.18	0.58
18	16.18	2.79	5.44	0.48
24	8.62	1.03	6.10	0.47
27	8.19	0.78	5.61	0.54

4.3 InGaN LED のサファイア基板厚依存性

4.3.1 試料作製方法および実験

本実験では、常圧 MOCVD 法によりサファイア基板上に作製した InGaN 3QW LED を用いた。その構造は、GaN 緩衝層を約 30 nm 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 (5 nm/2 nm) 量子井戸を 3 周期、p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N を 20 nm, p-GaN ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) を 0.2 μm 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 (16 nm/70 nm/12 nm/60 nm), Au/Ni/Au (3 nm/6 nm/12 nm) を使い、p 側電極は半透明電極とした。また、半透明電極の一部に p 側パッド用電極 Ni/Au (12 nm/60 nm) を作製し、LED プロセス終了後、サファイア基板を 100 μm に研磨し、Si 基板(厚さ約 200 μm) を用いてエッチング用マスクパターンを形成した。そして、サファイア基板の厚さを変えて LED 特性の変化を調べるため、エッチング時間を 12, 18, 24, 27 hour と変化させて、サファイア基板のエッチングを行った。ここで、RIE におけるエッチング条件は、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 とし、1 回のエッチング時間を 3 hour とした。RIE でのサファイア基板エッチング後、基板裏面に TiO₂/SiO₂ 誘電体多層膜反射鏡を 10 ペア形成した。作製した試料の構造図を、図 4-8 に示す。

4.3.2 実験結果および考察

LED に用いた $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア誘電体多層膜反射鏡の反射率測定結果を図 4-9 に示す。ここで、反射率は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。作製した LED のエッチング時間と深さ、エッチング前とエッチング後のサファイア基板の厚さを表 4-3 に示す。

表 4-3 エッチング時間と深さ、サファイア基板の厚さ

Etching time (hour)	Etching depth (μm)	Thickness of sapphire (μm)	
		Before Etching	After Etching
12	40.7	102	61.3
18	61.1	98	36.9
24	81.5	95	13.5
27	91.6	93	1.4

RIE にてサファイア基板をエッチングし $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の順方向 I-V 特性を、エッチング時間 12, 18, 24, 27 hour それぞれ図 4-10, 4-11, 4-12, 4-13 に示し、注入電流 20 mA 時における直列抵抗 R_s , 順方向バイアス電圧 V_f のエッチング後/エッチング前の比とエッチング時間との関係を図 4-14, 表 4-4 に示す。図 4-14(a) に示すようにエッチング時間による直列抵抗の明確な依存性は確認されなかった。しかし、図 4-14(b) に示すようにエッチング時間の増加にともない、エッチング後の順方向バイアス電圧が増加していることがわかる。これは、LED 作製後にサファイア基板裏面のエッチングを行ったことにより、電極・半導体界面に何らかのダメージが生じ、接触抵抗が増加したのではないかと考えている。

RIE にてサファイア基板をエッチングし $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 20 mA 時における発光スペクトル特性を、エッチング時間 12, 18, 24, 27 hour それぞれ図 4-15, 4-16, 4-17, 4-18 に示す。また、作製した LED の発光ピーク波長および半値幅を表 4-5 に示す。

表 4-4 作製した LED の I-V 特性 @ 20 mA

Etching time (hour)	(1) Before Etching		(2) After Etching		ratio = (2)/(1)	
	Rs (Ω)	Vf (V)	Rs (Ω)	Vf (V)	Rs	Vf
12	58.57	4.70	46.46	4.85	0.79	1.03
18	64.34	4.70	75.63	5.05	1.18	1.07
24	53.34	5.25	49.74	5.70	0.93	1.09
27	66.64	5.15	49.48	5.90	0.74	1.15

図 4-15, 4-16, 4-17, 4-18 よりエッチング時間が 24 hour までは、7 nm のモード間隔、つまり、サファイア基板と GaN 薄膜との境界と GaN 薄膜と空気との境界間での共振が確認できたが、27 hour エッチングを行った LED では、共振を確認することはできなかった。また、表 4-5 よりエッチングを行いサファイア基板裏面に TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成することによる発光ピーク波長、半値幅の変化はないことがわかる。

表 4-5 作製した LED の発光ピーク波長と半値幅

Etching time (hour)	Before Etching and without DBR		After Etching and with DBR	
	Peak wavelength (nm)	FWHM (nm)	Peak wavelength (nm)	FWHM (nm)
12	417.6	17.4	417.8	17.8
18	414.8	17.8	415.4	18.2
24	416.2	18.0	416.6	18.8
27	418.2	17.6	418.2	21.2

RIE にてサファイア基板をエッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性を、エッチング時間 12, 18, 24, 27 hour それぞれ図 4-19, 4-20, 4-21, 4-22 に示し、注入電流 20 mA 時のエッチング後/エッチング前の発光強度比とサファイア基板の厚さとの関係を図 4-23 に示す。また、作製した LED のエ

エッチング時間とサファイア基板の厚さ、注入電流 20 mA 時の発光強度、並びにエッチング後/エッチング前の発光強度比を表 4-6 に示す。図 4-23, 表 4-5 より裏面に 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が 1.57 倍～1.86 倍に増加していることがわかる。しかし、サファイア基板の厚さが薄くなるにともない発光強度比が減少している。

表 4-6 作製した LED の発光強度 @ 20 mA

Etching time (hour)	Thickness of sapphire after Etching (μm)	Output power (μW)		
		(1) Before Etching and without DBR	(2) After Etching and with DBR	ratio = (2)/(1)
12	61.3	23.98	44.68	1.86
18	36.9	32.03	59.25	1.85
24	13.5	31.52	53.68	1.70
27	1.4	28.78	45.05	1.57

以上の実験結果より、サファイア基板の厚さの減少にともない、発光強度比が減少し、また共振によるモードが消滅した。これは、サファイア基板が薄くなると、エピ層に生じていた圧縮応力によりサファイア基板が変形するため、共振器の平行性が失われたものと考えられる。そこで、変形具合を定量的に評価するため作製した LED の表面、およびサファイア基板裏面のエッチング面の表面高低差をレーザフォーカス変位計にて測定した。

RIE にてサファイア基板をエッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED のレーザフォーカス変位計測定結果を、エッチング時間 12, 18, 24, 27 hour それぞれ図 4-24, 4-25, 4-26, 4-27 に示す。図 4-24, 4-25, 4-26 より、12, 18, 24 hour エッチングした LED の表面では、約 5 μm の凹みが観察された。しかし、図 4-27 よりサファイア基板を厚さ 1.4 μm までエッチングした LED の表面では、約 30 μm の凹みが観察され、エッチング面においても同様な凹みが観察された。

次に RIE にてサファイア基板をエッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡

を形成した LED の断面 SEM 像を、エッチング時間 12, 18, 24, 27 hour それぞれ 図 4-28, 4-29, 4-30, 4-31 に示す。これらの断面 SEM 像より作製した LED のサファイア基板側に $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡がエッチング面の影響をうけることなく、規則正しい周期構造で形成されていることがわかる。また、図 4-31 よりエッチング時間 27 hour の LED ではエッチング後のサファイア基板の厚さに、分布があることが確認できる。この面内におけるサファイア基板の厚さの分布、及び変形のため共振のモードが消滅したものであると考えられる。

4.3.3 まとめ

RIE にてサファイア基板をエッチングし $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の作製をした。注入電流 20 mA 時の発光スペクトルより、27 hour エッチングを行い、サファイア基板を $1.4\ \mu\text{m}$ まで薄くした LED において、共振によるモードは観察されなかった。また、I-L 特性ではエッチング時間の増加にともない発光強度が減少した。そこで、表面変位観察及び断面 SEM 観察を行ったところ、表面変位観察像より、27 hour エッチングした LED において約 $30\ \mu\text{m}$ の凹みがあることがわかった。また、断面 SEM 像よりエッチングした面内においてサファイア基板の厚さに分布があることもわかった。サファイア基板の厚さ分布、及び変形がモードの消滅を引き起こした原因であると考えられる。

そこで、エッチング後のサファイア基板における厚さ分布と、発光素子内での変形の影響を低減するため、p 側電極の面積を $0.2\ \text{mm}^2$ から $0.003\ \text{mm}^2$ へと減少させた LED を作製した。

4.4 発光面積微小化 InGaN LED

4.4.1 試料作製方法および実験

本実験では常圧 MOCVD 法によりサファイア基板の上に作製した InGaN LED 構造を用いた。その構造は、GaN 緩衝層を約 30 nm 堆積させた後、n-GaN を $2\ \mu\text{m}$, n- $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を $0.1\ \mu\text{m}$, n- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ を 20 nm, n- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ を $0.3\ \mu\text{m}$, n-GaN を $0.1\ \mu\text{m}$, $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}/\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}$ (5 nm/3 nm)量子井戸を 24 周期、p- $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ を 20 nm, p-GaN を $0.1\ \mu\text{m}$, p- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ を $0.15\ \mu\text{m}$, p-GaN を $0.2\ \mu\text{m}$ 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 (16 nm/70 nm/12 nm/60 nm),

Pd/Ni/Au (3 nm/6 nm/12 nm)を用い、p 側電極は半透明電極とし、面積を 0.003 mm²とした。また、半透明電極の一部に p 側パッド用電極 Ni/Au (12 nm/60 nm)を作製し、LED プロセス終了後、サファイア基板を 100 μm に研磨し、Si 基板(厚さ約 200 μm)を用いてエッチング用マスクパターンを形成した。ここで、RIE におけるエッチング条件は、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 とし、1 回のエッチング時間を 3 hour とし、エッチング時間を 27 hour とした。RIE でのエッチング後に、基板裏面に TiO₂/SiO₂ 誘電体多層膜反射鏡を 10 ペア形成した。作製した試料の構造図を、図 4-32 に示す。

4.4.2 実験結果および考察

LED に用いた TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡の反射率測定結果を図 4-33 に示す。ここで、反射率は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。作製した LED のエッチング時間と深さ、エッチング前とエッチング後のサファイア基板の厚さを表 4-7 に示す。今回は、研磨後のサファイア基板の厚さが 100 μm であったため、サファイア基板を 27 hour エッチングした LED の最終的なサファイア基板の厚さは 8.4 μm となった。

表 4-7 エッチング時間と深さ、サファイア基板の厚さ

Etching time (hour)	Etching depth (μm)	Thickness of sapphire (μm)	
		Before Etching	After Etching
27	91.6	100	8.4

RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-V 特性を、図 4-34 に示す。また、作製した LED のエッチング前後の注入電流 20 mA 時における直列抵抗 R_s, 順方向バイアス電圧 V_f, 並びにエッチング後/エッチング前の比を表 4-8 に示す。図 4-34, 表 4-8 より、エッチングを行うことにより立ち上がり電圧が増加しているが、注入電流 20 mA 時における直列抵抗が減少していることがわかる。これは、LED 作製後にサフ

ァイア基板裏面のエッチングを行ったことにより、電極・半導体界面に何らかのダメージが生じ、接触抵抗が増加したためであると考えている。

表 4-8 作製した LED の I-V 特性 @ 20mA

(1) Before RIE		(2) After RIE		ratio = (2)/(1)	
Rs (Ω)	Vf (V)	Rs (Ω)	Vf (V)	Rs	Vf
81.41	8.05	49.81	8.00	0.61	0.99

RIEにてサファイア基板を 27 hour エッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 10 mA 時における発光スペクトル特性を、図 4-35 に示す。また、作製した LED の発光ピーク波長および半値幅を表 4-9 に示す。図 4-35 より、エッチング前の LED では共振によるモードが見られなかった。しかし、エッチングを行い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 ではモード間隔 4 nm の共振が確認できた。ここで、モード間隔 4 nm は TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡とサファイア基板との境界と GaN 薄膜と空気間との境界間、約 11 μm の共振器長に相当するものである。また、表 4-9 に示すようにエッチングを行いサファイア基板裏面に TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成することによる発光ピーク波長、半値幅の変化はないことがわかる。

表 4-9 作製した LED の発光ピーク波長と半値幅

Before Etching without DBR		After Etching with DBR	
Peak wavelength (nm)	FWHM (nm)	Peak wavelength (nm)	FWHM (nm)
430.4	21.2	430.2	21.4

RIEにてサファイア基板を 27 hour エッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性を、図 4-36 に示す。また、作製した LED の注入電流 10 mA 時における発光強度、並びにエッチング前後の発光強度比を表 4-10

に示す。図 4-36 よりエッチングした LED では、注入電流 7 mA において発光強度が飽和し、それ以降は低下していることがわかる。また、表 4-10 より注入電流 10 mA 時における発光強度比は、TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成したにもかかわらず 0.45 と低くなっている。これらの原因としては、サファイア基板の薄化により放熱性が悪化したためであると考えられる。

表 4-9 作製した LED の発光強度 @ 10 mA

Output power (μW)		
(1) Before Etching and without DBR	(2) After Etching and with DBR	ratio = (2)/(1)
51.4	22.9	0.45

RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED のレーザフォーカス変位計測定結果を図 4-37 に示す。図 4-37 より今回作製した LED の表面では、約 5 μm の凹みが観察された。これは、4.3 項にてサファイア基板を 1.4 μm までエッチングした LED の 6 分の 1 程度であった。

次に RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の断面 SEM 像を、図 4-38 に示す。図 4-38 より作製した LED のサファイア基板側に TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡はエッチング面の影響をうけることなく、規則正しい周期構造で形成されていることがわかる。

4.4.3 まとめ

p 側電極の面積を 0.003 mm² と微小化した LED を作製し、サファイア基板を 27 hour エッチングした。その後、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。作製した LED の発光スペクトルでは、エッチング前には見られなかったモードがエッチング後、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ことにより確認できた。また、このモード間隔 4 nm は

TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡とサファイア基板との境界と GaN 薄膜と空気間との境界間、約 11 μm の共振器長に相当するものであることが確認された。しかし、I-L 特性では反射鏡の形成による発光強度の増加は得られなかった。これは、サファイア基板の薄化により放熱性が悪化したためであると考えられる。

これらの結果より、サファイア基板の厚さを 8 μm までエッチングし、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。

第 4 章 参考文献

- [1] W. S Wong, T. Sands, and N. W. Cheung, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 599 (1998)
- [2] W. S Wong, J. Kruger, Y. Cho, B. P. Linder, E. R. Weber, N. W. Cheung, and T. Sands, *Proceedings of the Symposium on LED for Optoelectronic Applications and the 28th State of the Art Programs on Compound Semiconductors*, 1998, Vol. 98-2, p. 377.
- [3] W. S Wong, N. W. Cheung, T. Sands, M. Kneissl, D. P. Bour, P. Mei, L. T. Romano, and N. M. Johnson, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1360 (1999)
- [4] M. K. Kelly, O. Ambacher, R. Dimitrov, H. Angerer, R. Handschuh, and M. Stutzmann, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **482**, 973 (1998)
- [5] Y. K. Song, M. Diagne, H. Zhou, A. V. Nurmikko, C. Carter-Coman, R. S. Kern, F. A. Kish, and M. R. Krames, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3720 (1999)
- [6] E. Yablonovitch, T. Gmitter, J. P. Harbison, and R. Bhat, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 2222 (1987)
- [7] E. Yablonovitch, T. Sands, D. M. Hwang, I. Schnitzer, T. J. Gmitter, S. K. Shastry, D. S. Hill, and J. C. C. Fan, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 3159 (1991)

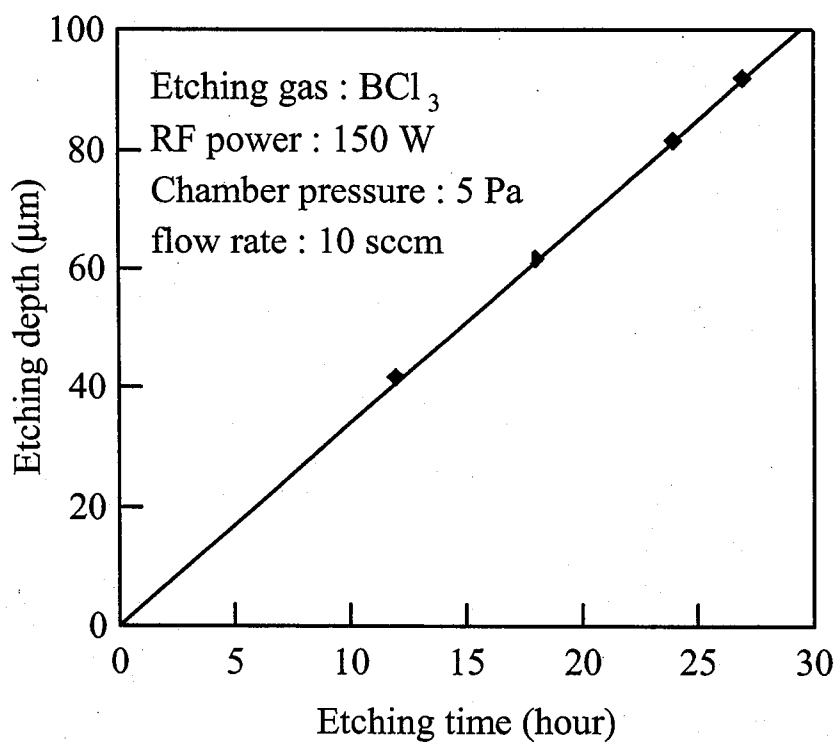


図 4-1 RIE によるサファイア基板のエッチング時間とエッチング深さの関係

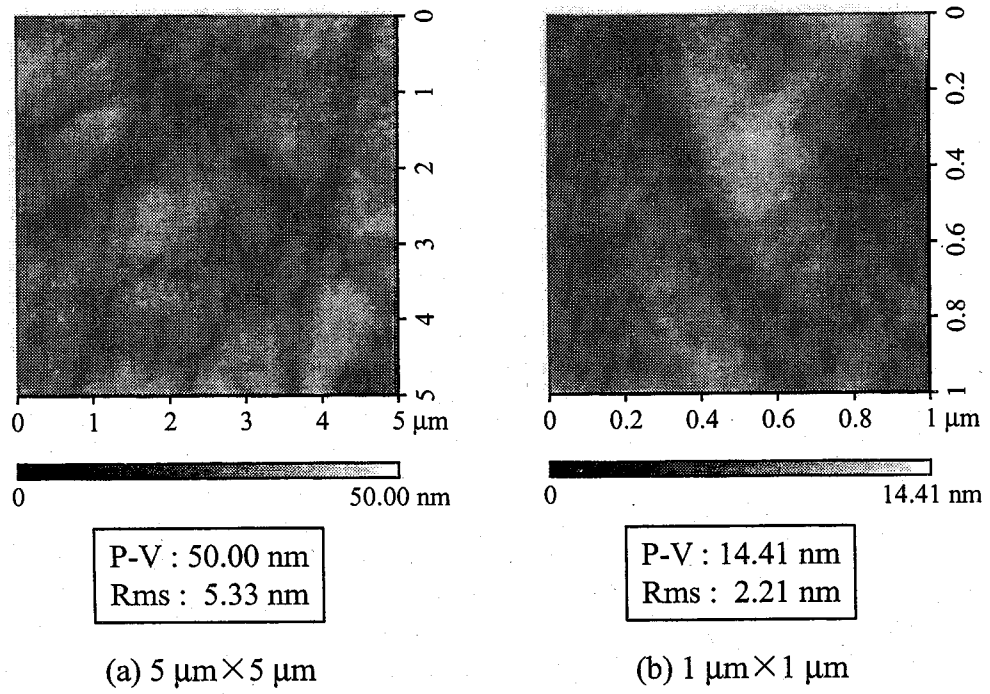


図 4-2 300 μm に研磨したサファイア基板のAFM像 (RIE Etching 前)

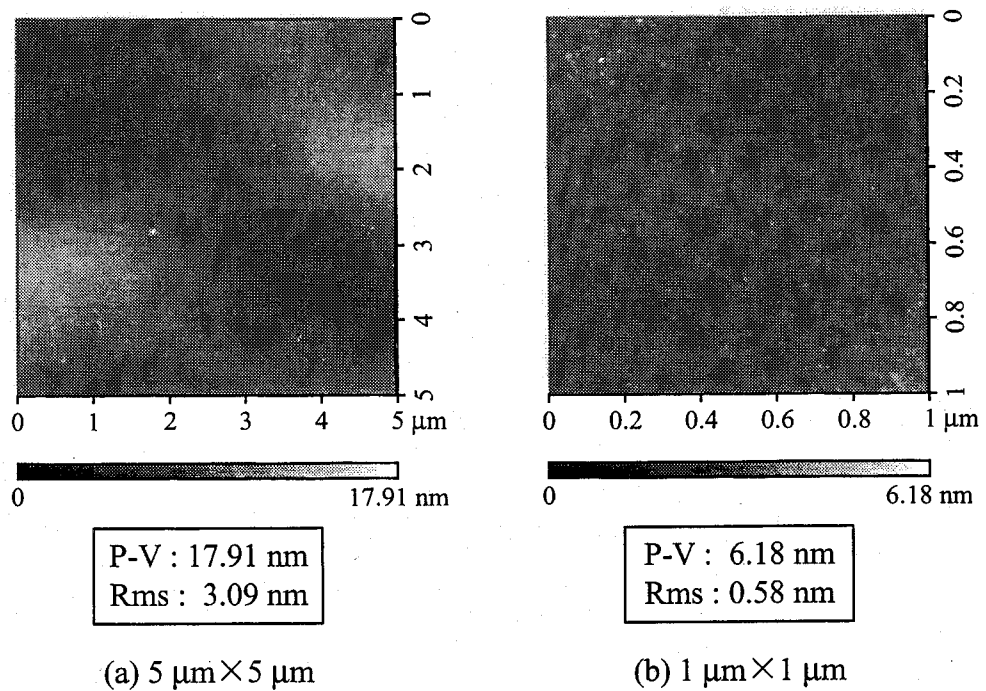


図 4-3 研磨後RIEにて12 hourエッチングしたサファイア基板のAFM像

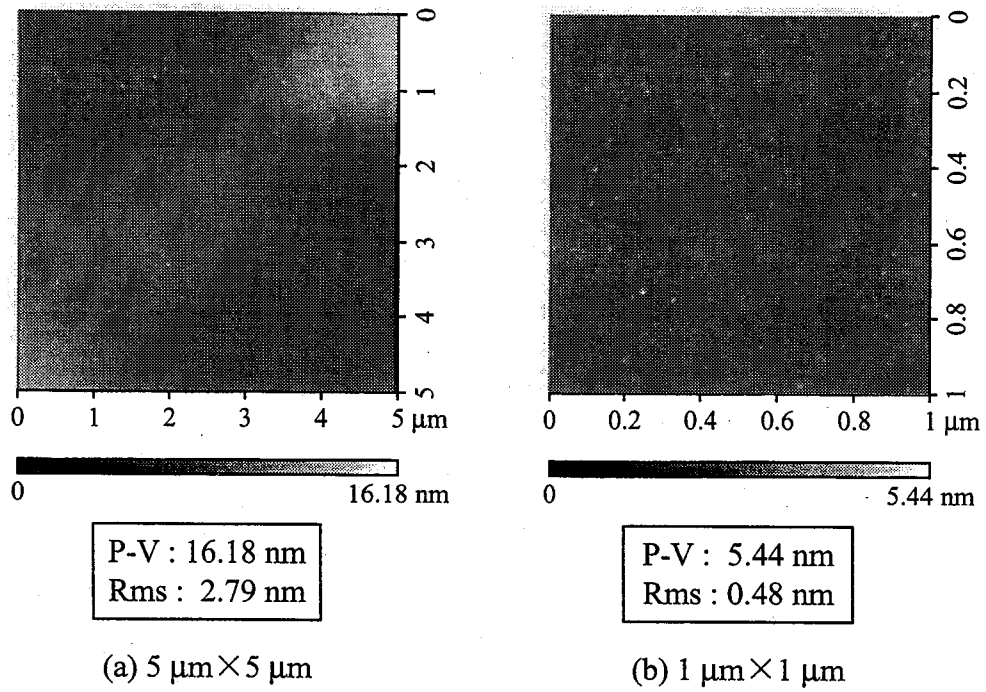


図 4-4 研磨後RIEにて18 hourエッチングしたサファイア基板のAFM像

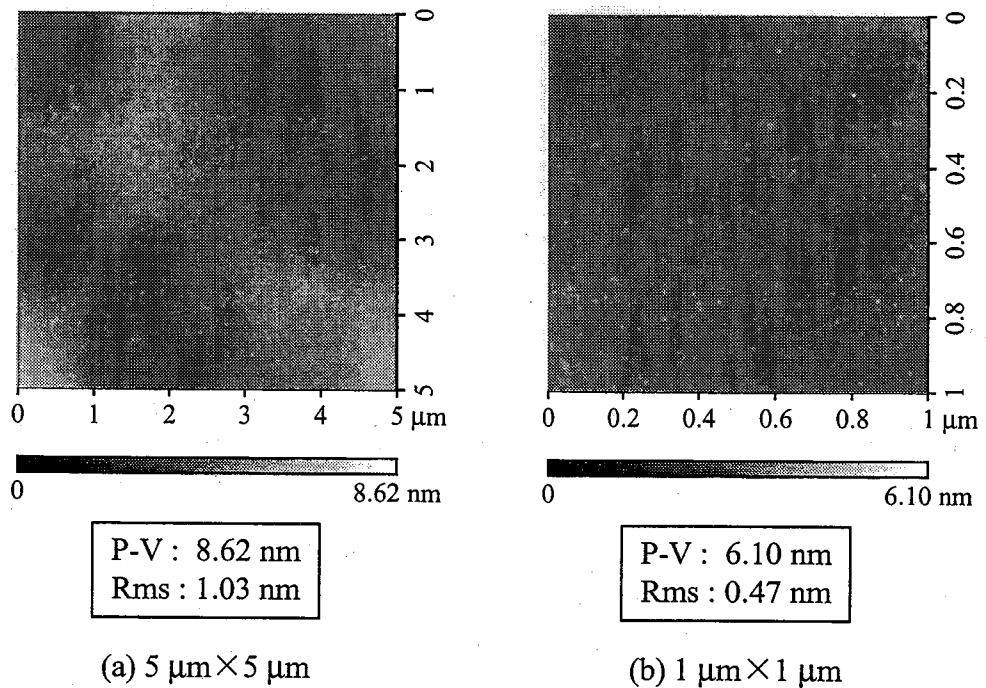
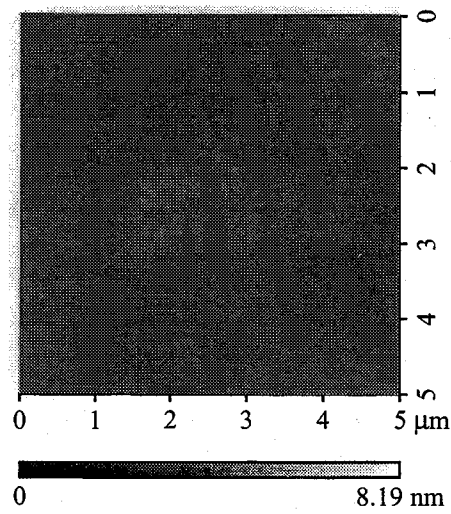
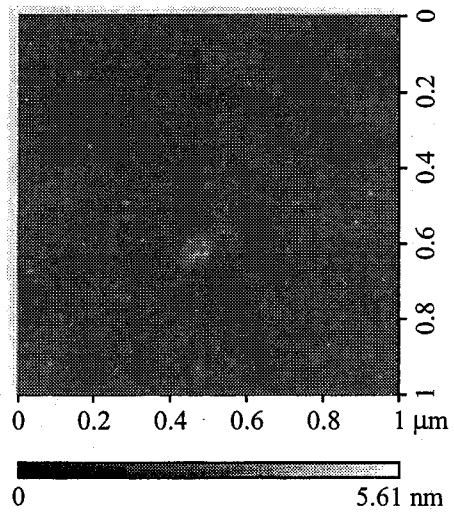


図 4-5 研磨後RIEにて24 hourエッチングしたサファイア基板のAFM像



P-V : 8.19 nm
Rms : 0.78 nm

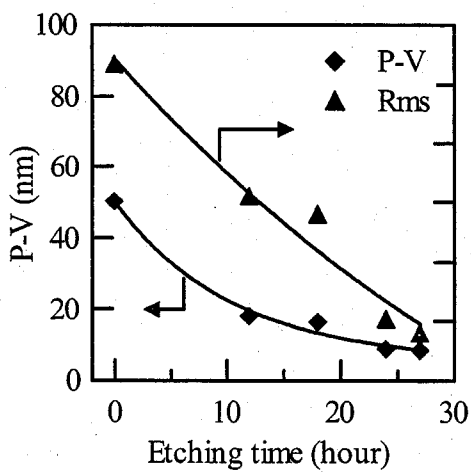
(a) 5 μm × 5 μm



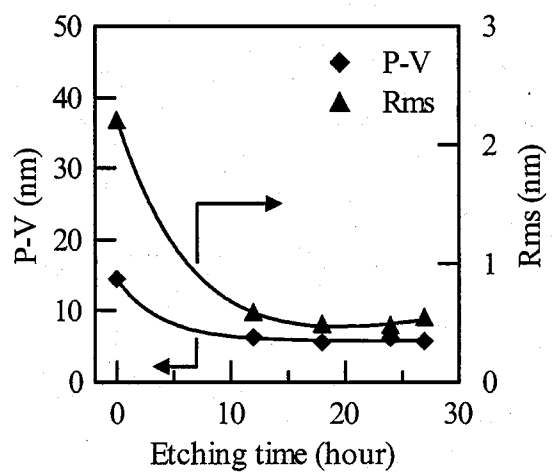
P-V : 5.61 nm
Rms : 0.54 nm

(b) 1 μm × 1 μm

図 4-6 研磨後RIEにて27 hourエッチングしたサファイア基板のAFM像



(a) 5 μm × 5 μm



(b) 1 μm × 1 μm

図 4-7 RIEにてエッチングしたサファイア基板のエッチング時間とP-V, Rms

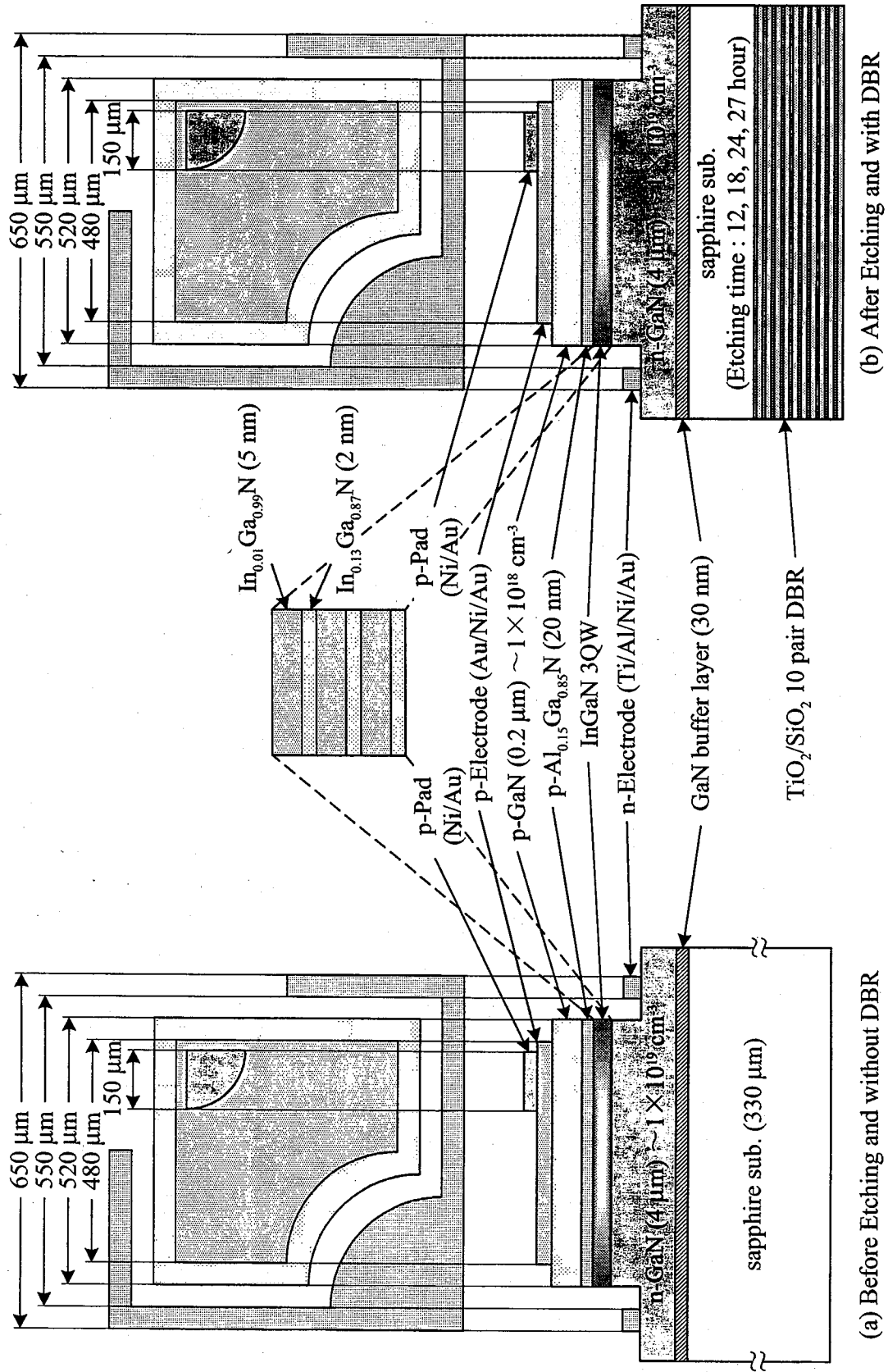


図 4-8 作製した試料の構造図

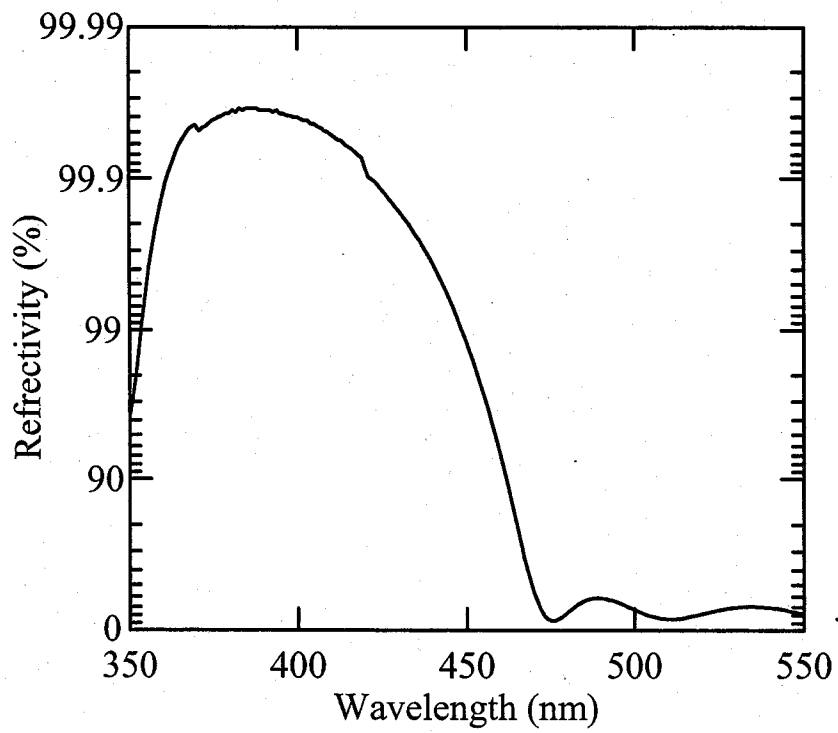


図 4-9 LED に用いた $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア誘電体多層膜反射鏡の反射率測定結果

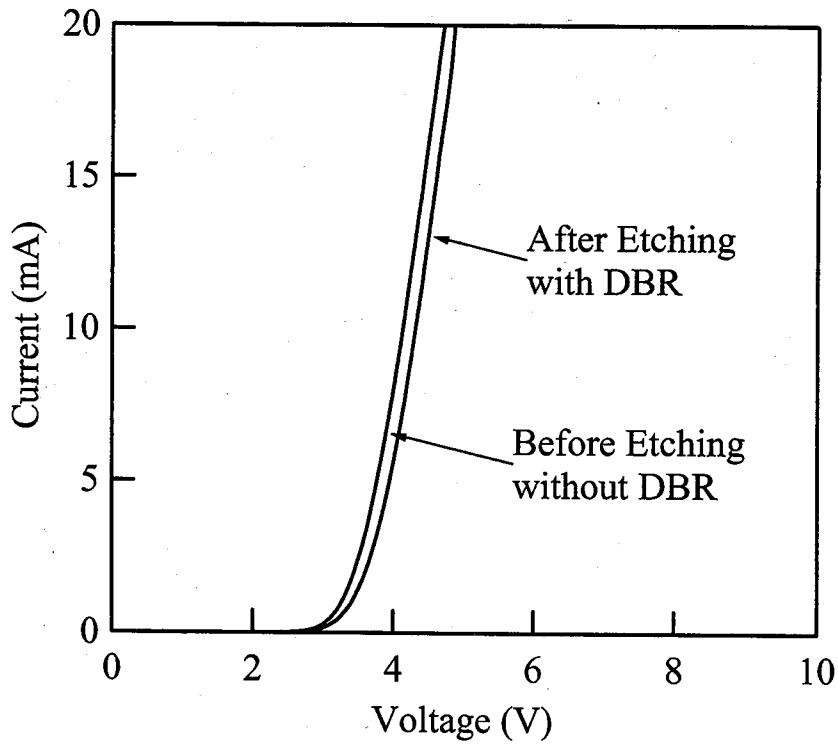


図 4-10 RIE にてサファイア基板を 12 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-V 特性

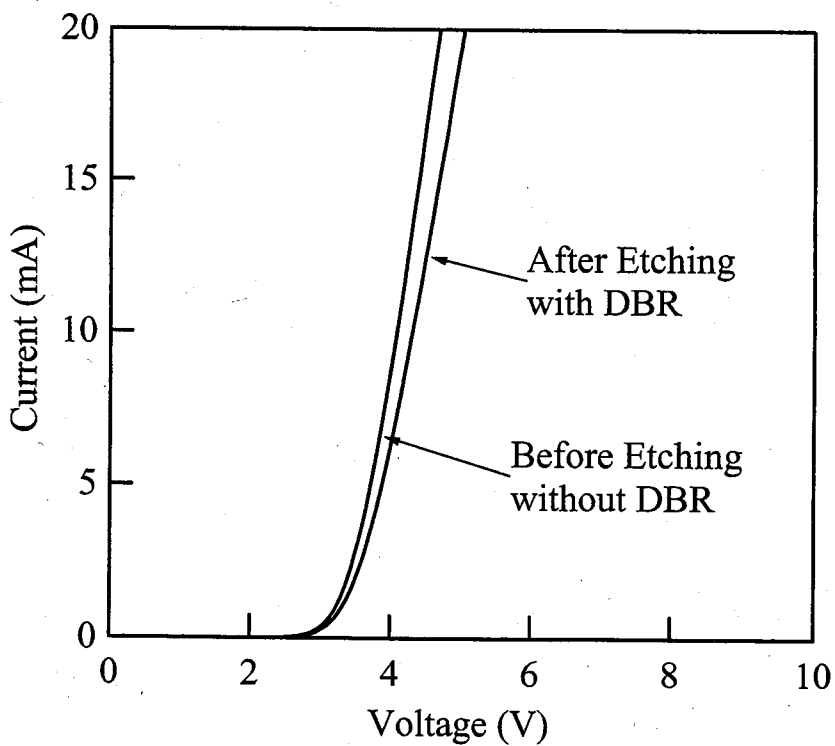


図 4-11 RIE にてサファイア基板を 18 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-V 特性

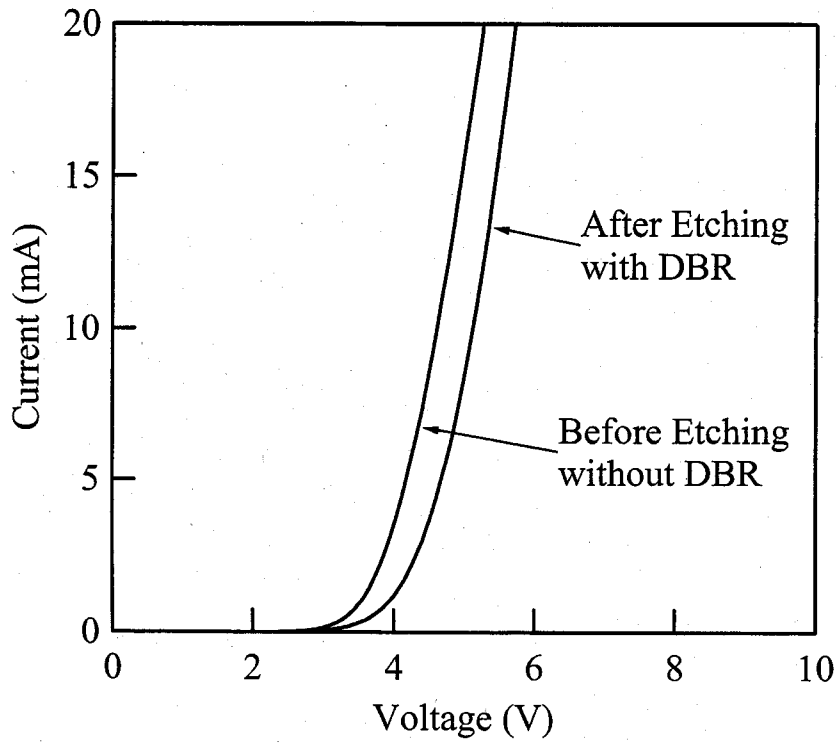


図 4-12 RIE にてサファイア基板を 24 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-V 特性

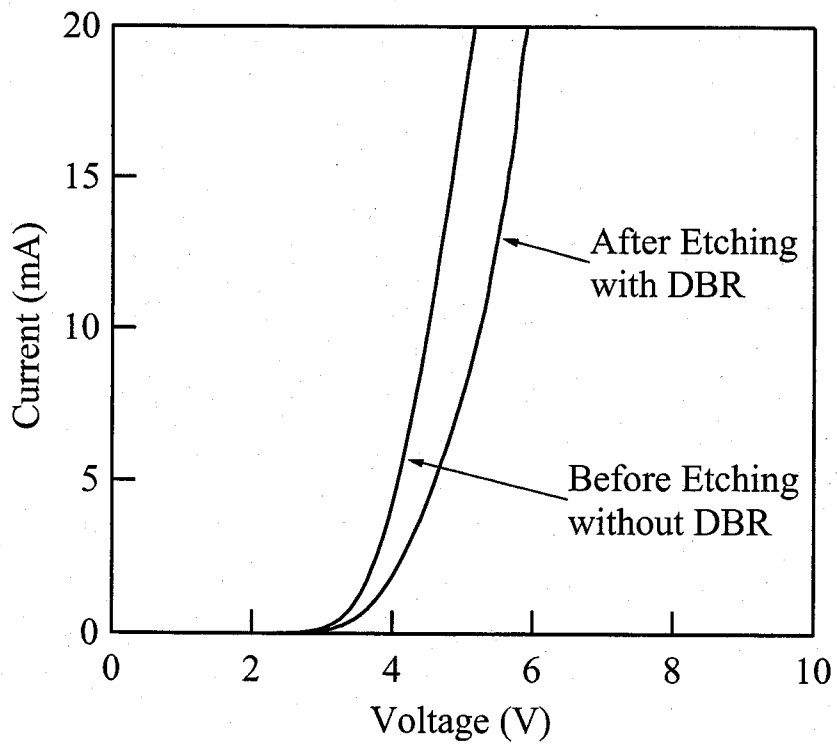
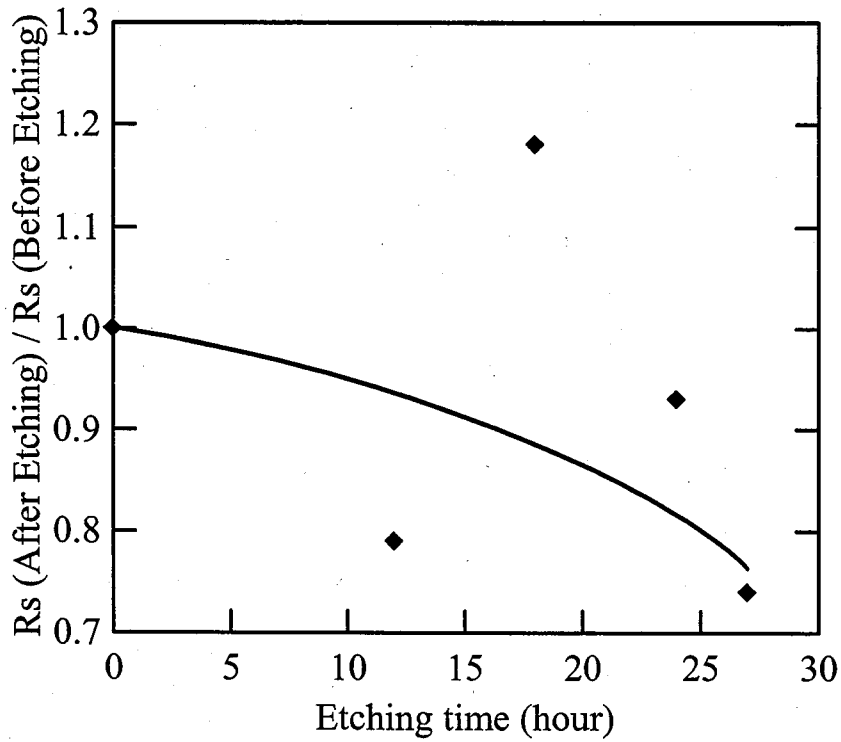
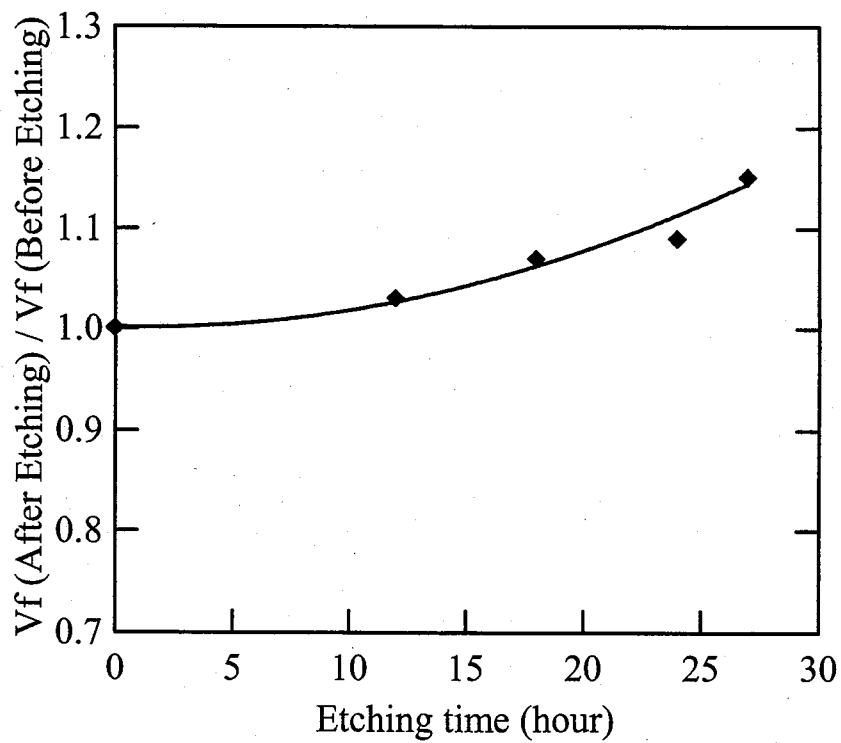


図 4-13 RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-V 特性



(a) 直列抵抗 R_s のエッチング後/エッチング前の比とエッチング時間



(b) 順方向バイアス電圧 V_f のエッチング後/エッチング前の比とエッチング時間

図 4-14 I-V 特性より得られた注入電流 20 mA 時の直列抵抗、
順方向バイアス電圧のエッチング後/エッチング前の比とエッチング時間

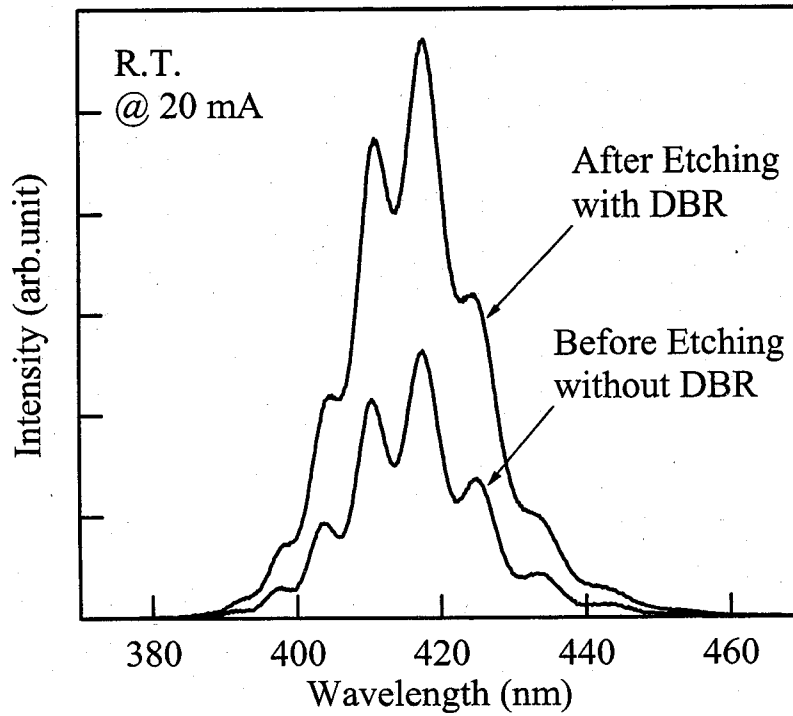


図 4-15 RIE にてサファイア基板を 12 hour エッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 20 mA 時における発光スペクトル

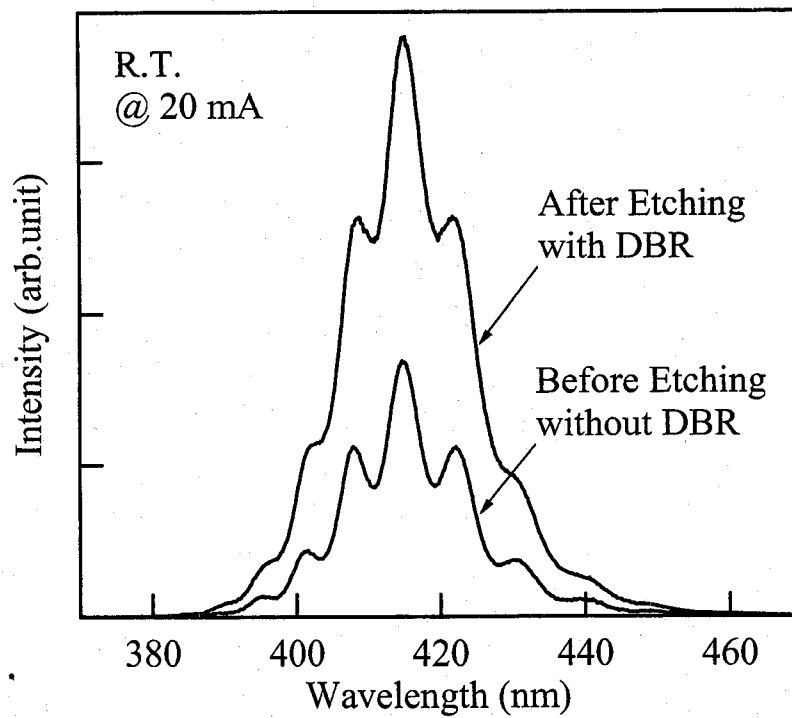


図 4-16 RIE にてサファイア基板を 18 hour エッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 20 mA 時における発光スペクトル

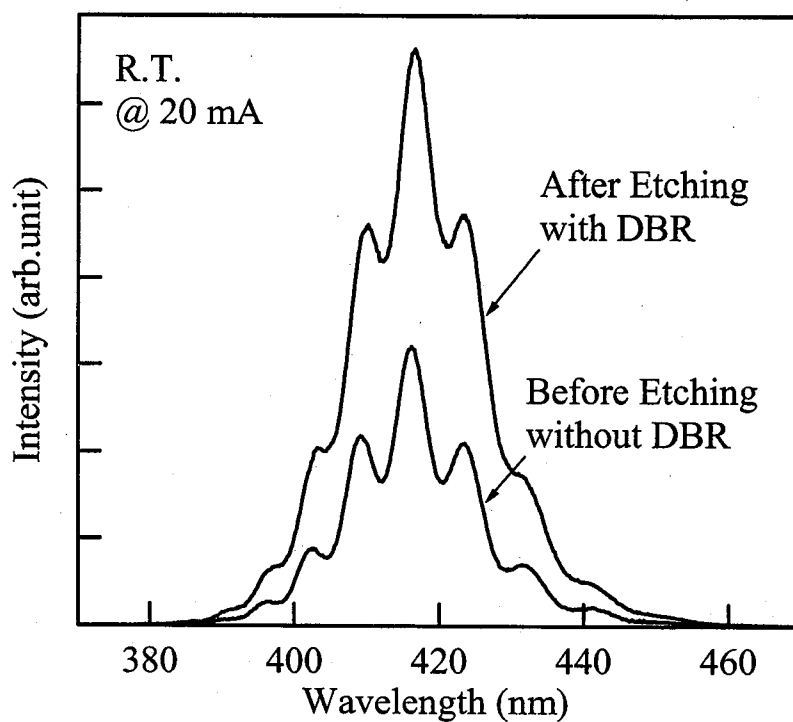


図 4-17 RIE にてサファイア基板を 24 hour エッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 20 mA 時における発光スペクトル

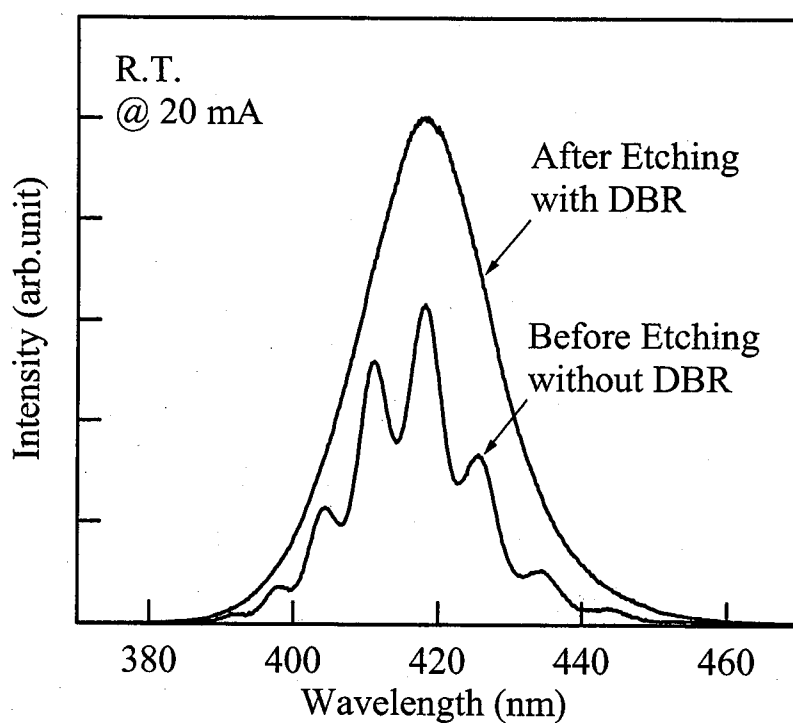


図 4-18 RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 20 mA 時における発光スペクトル

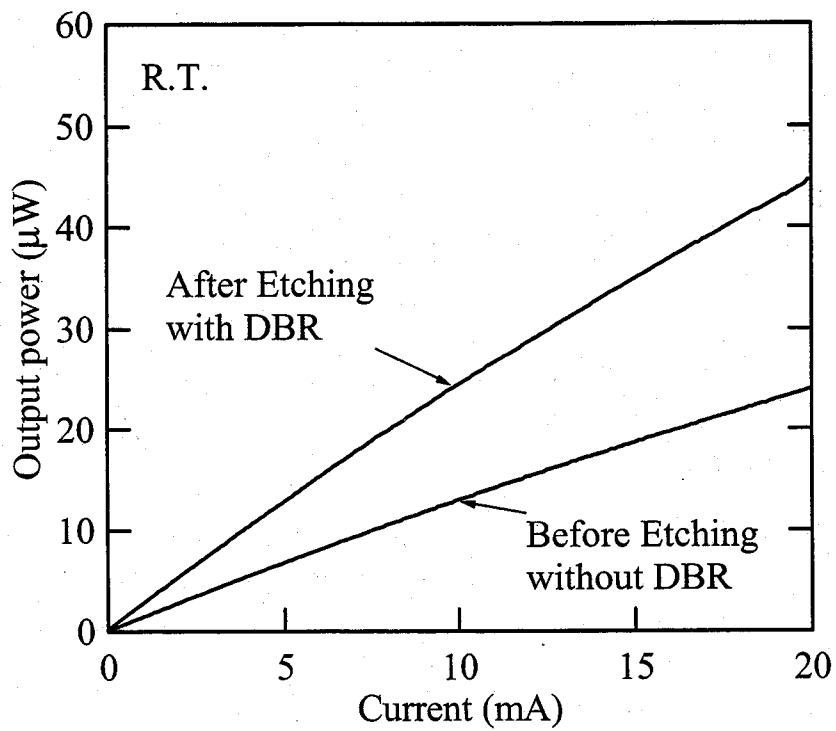


図 4-19 RIE にてサファイア基板を 12 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性

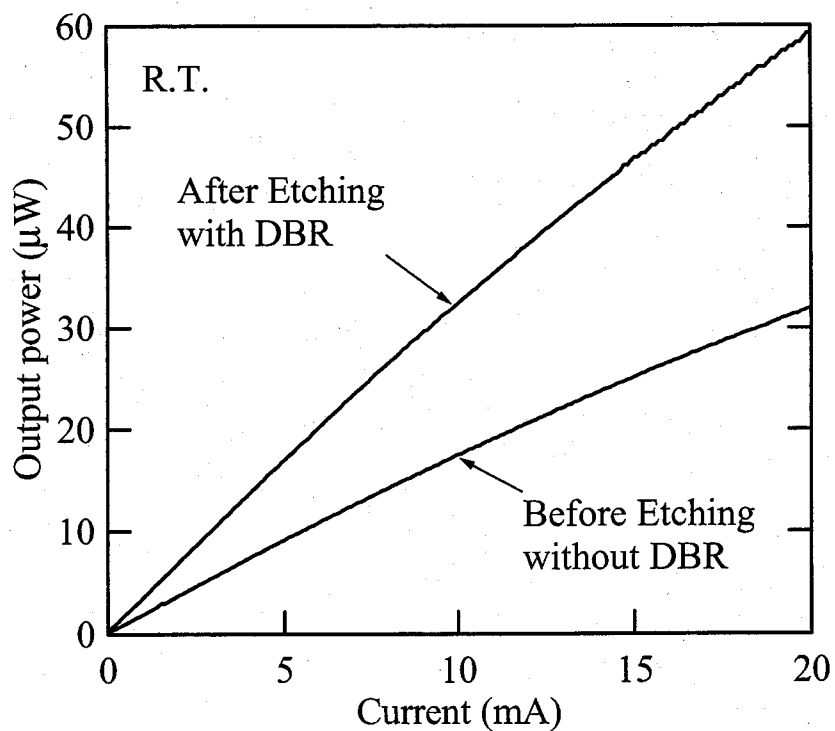


図 4-20 RIE にてサファイア基板を 18 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性

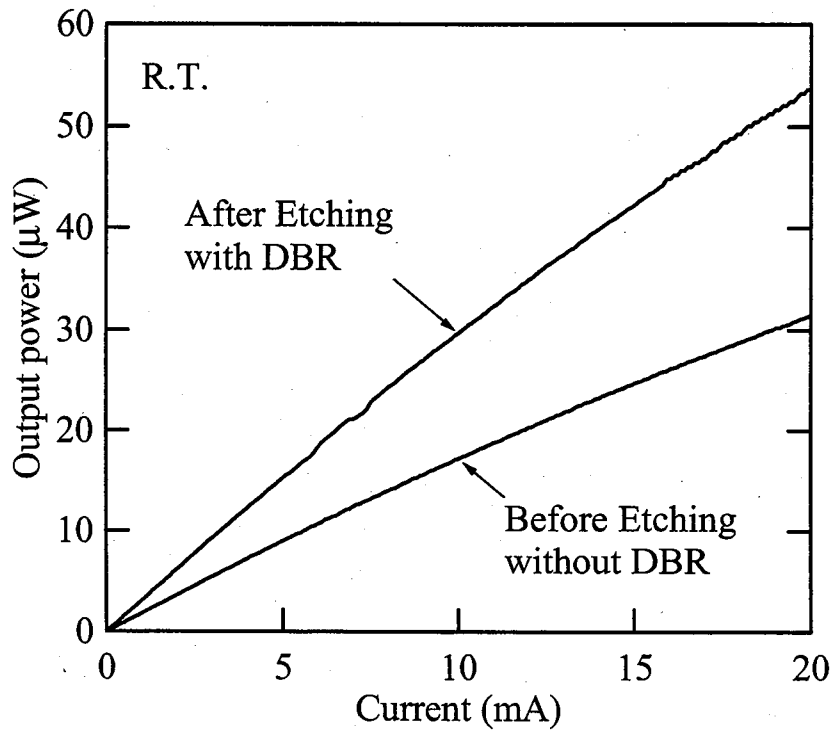


図 4-21 RIE にてサファイア基板を 24 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性

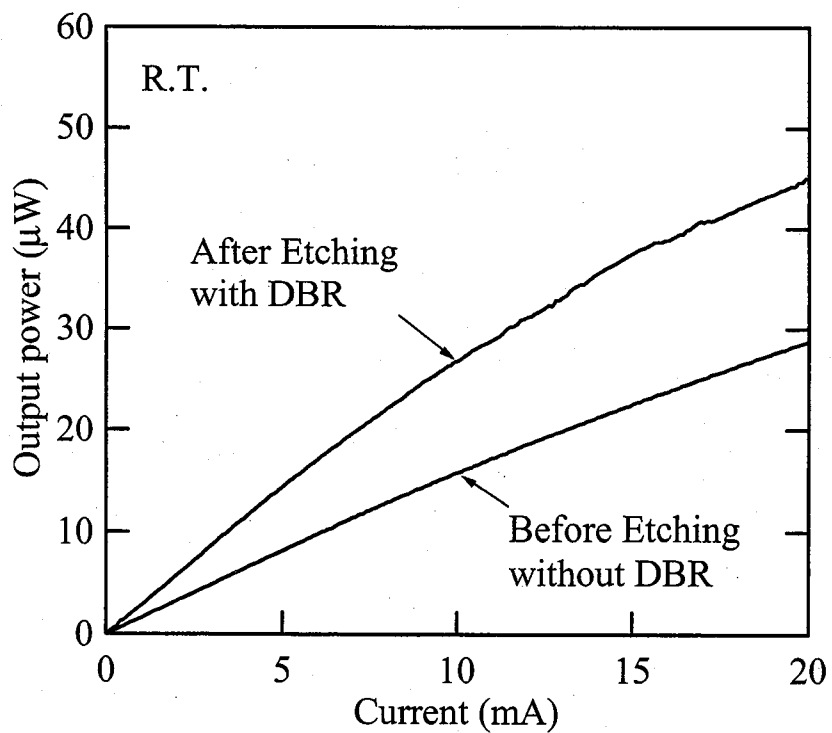


図 4-22 RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性

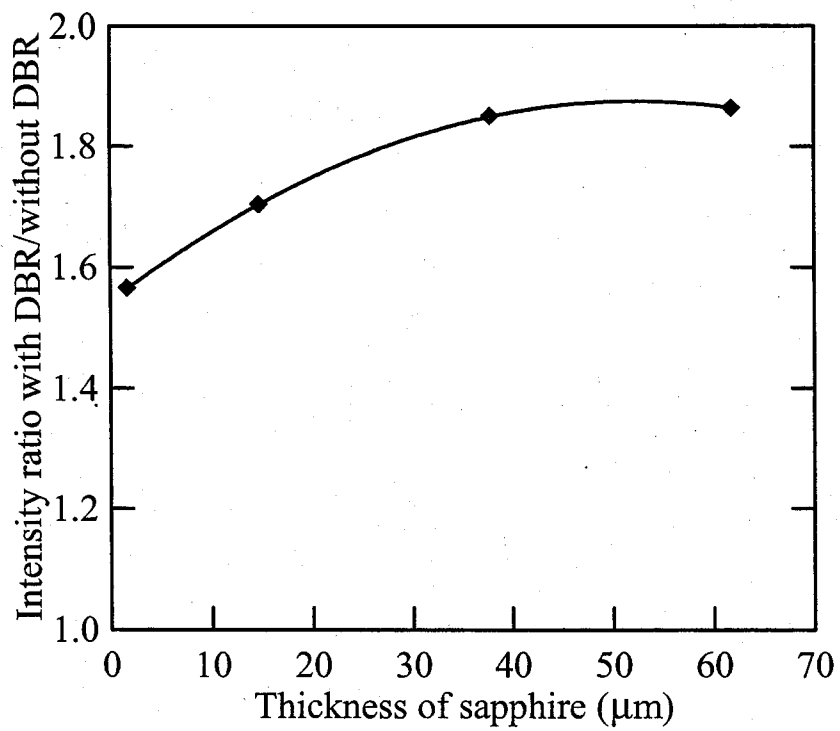
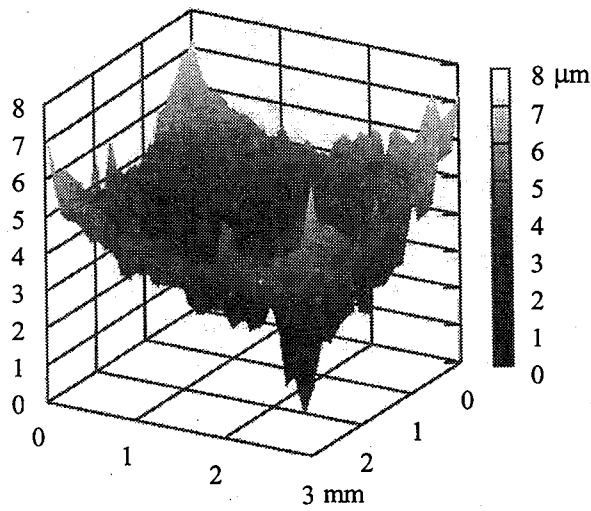
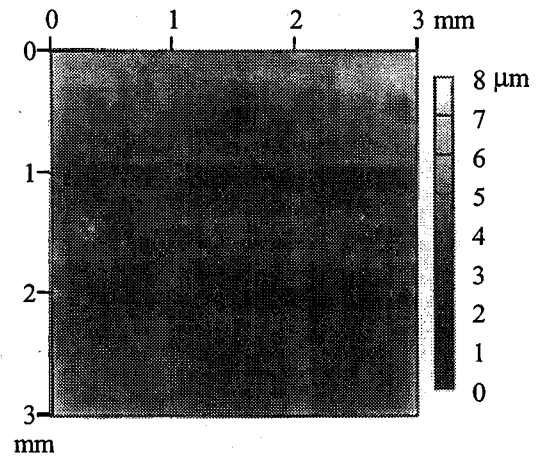


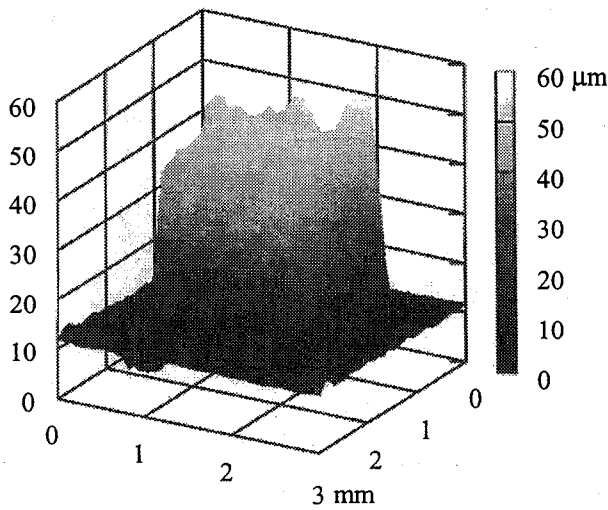
図 4-23 I-L 特性より得られた注入電流 20 mA 時における発光強度のエッチング後/エッチング前の比とサファイア基板の厚さ



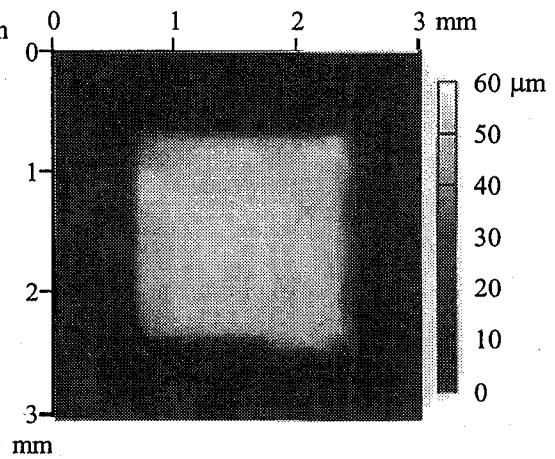
(a) 3次元表示(表面観察像)



(b) 2次元表示(表面観察像)

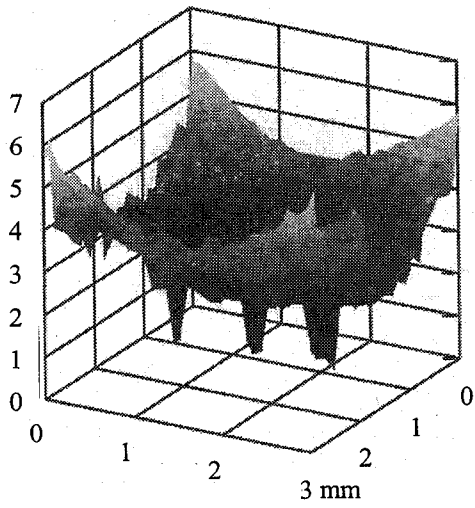


(c) 3次元表示(裏面観察像)

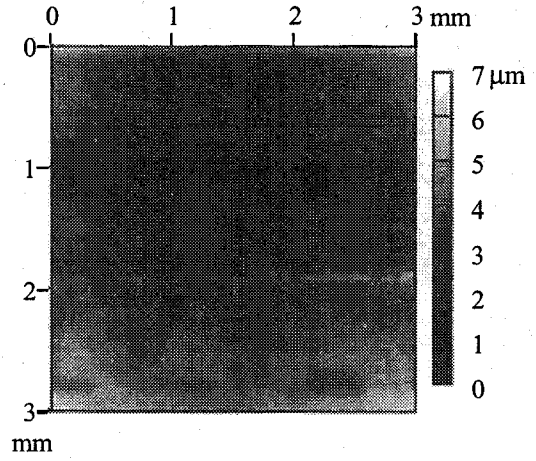


(d) 2次元表示(裏面観察像)

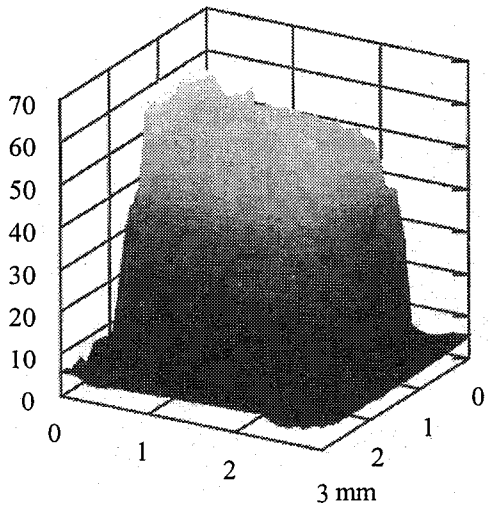
図 4-24 RIEにてサファイア基板を12 hourエッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの
エッチング領域におけるレーザフォーカス変位計測定結果



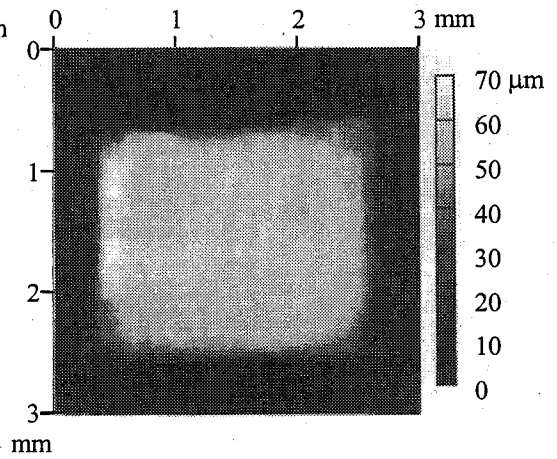
(a) 3次元表示(表面観察像)



(b) 2次元表示(表面観察像)

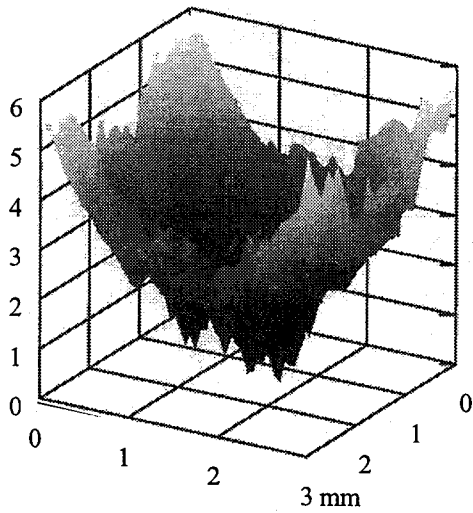


(c) 3次元表示(裏面観察像)

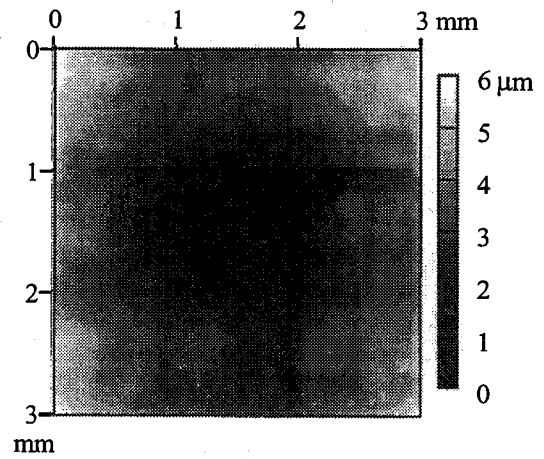


(d) 2次元表示(裏面観察像)

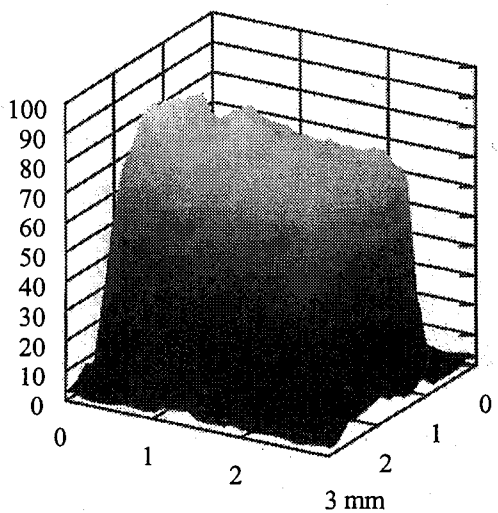
図 4-25 RIEにてサファイア基板を18 hourエッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの
エッチング領域におけるレーザフォーカス変位計測定結果



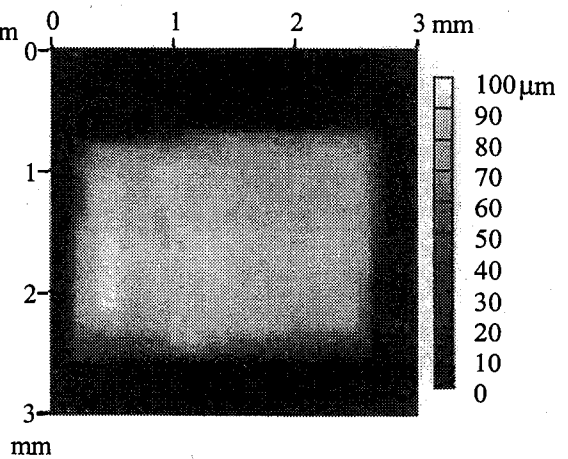
(a) 3次元表示(表面観察像)



(b) 2次元表示(表面観察像)

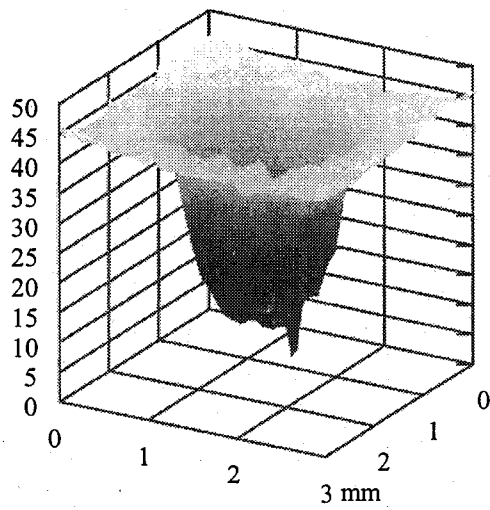


(c) 3次元表示(裏面観察像)

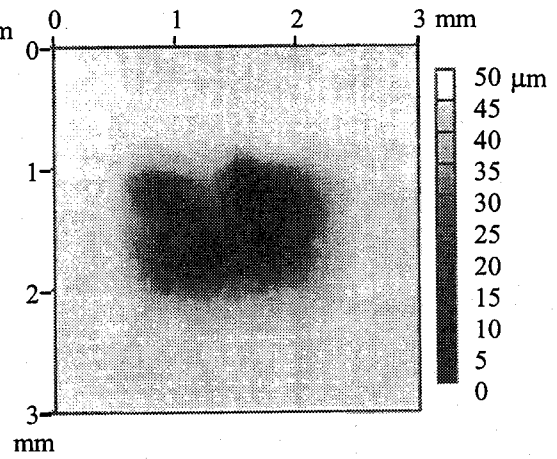


(d) 2次元表示(裏面観察像)

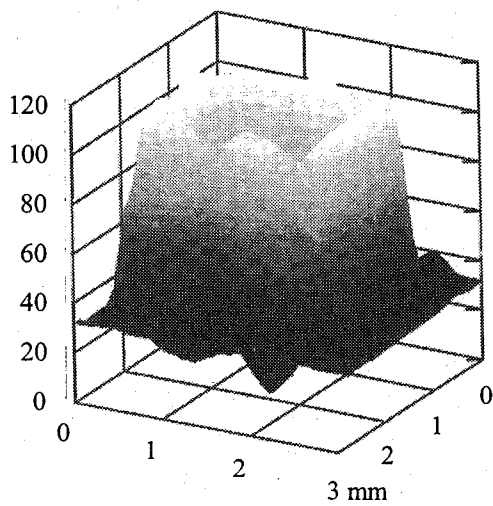
図 4-26 RIEにてサファイア基板を24 hourエッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの
エッチング領域におけるレーザーフォーカス変位計測定結果



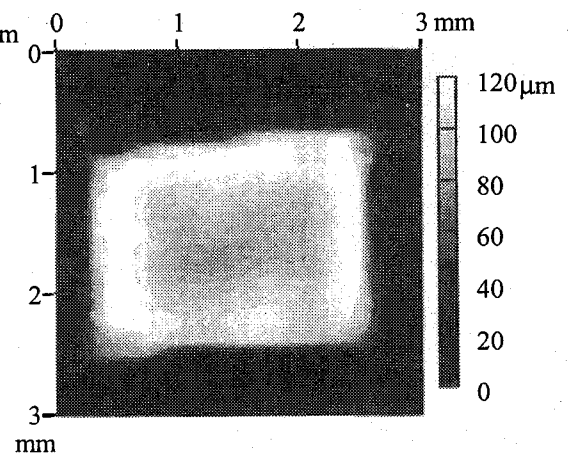
(a) 3次元表示(表面観察像)



(b) 2次元表示(表面観察像)

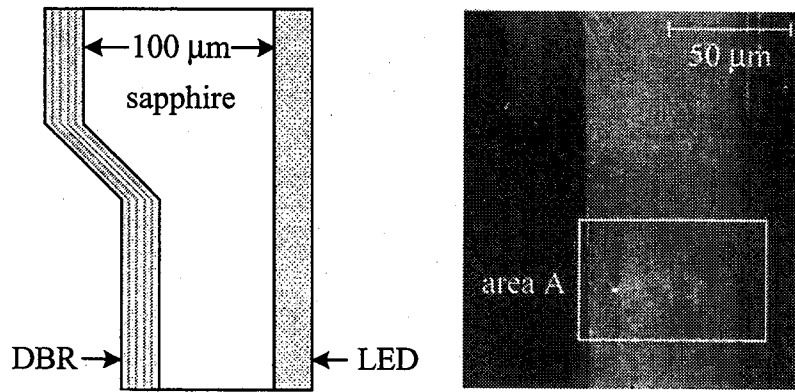


(c) 3次元表示(裏面観察像)

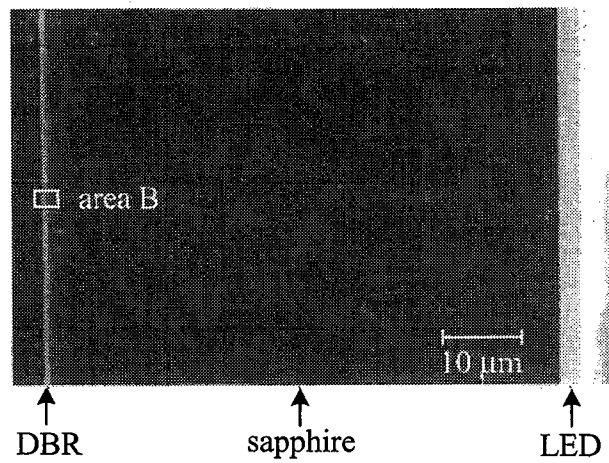


(d) 2次元表示(裏面観察像)

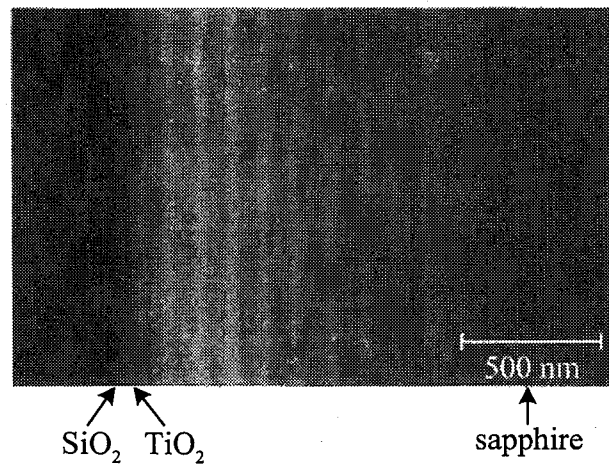
図 4-27 RIEにてサファイア基板を27 hourエッチングし、
 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの
 エッチング領域におけるレーザフォーカス変位計測定結果



(a) 全体像

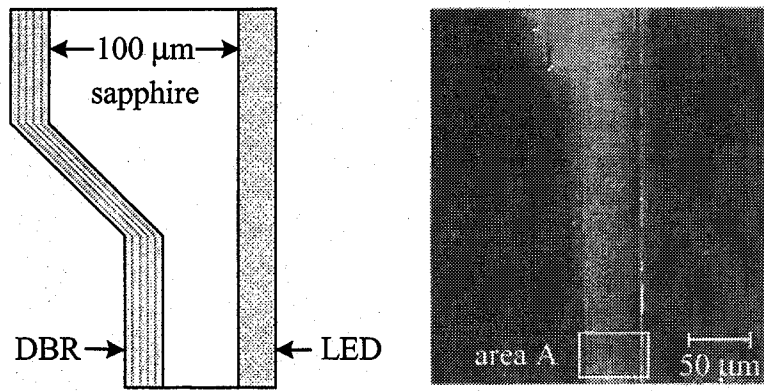


(b) area Aの拡大像

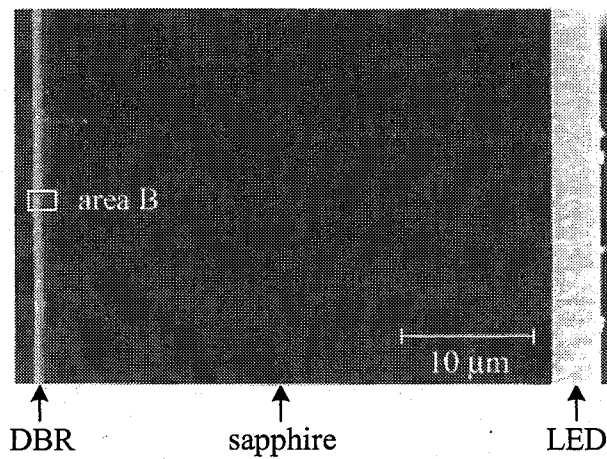


(c) area Bの拡大像

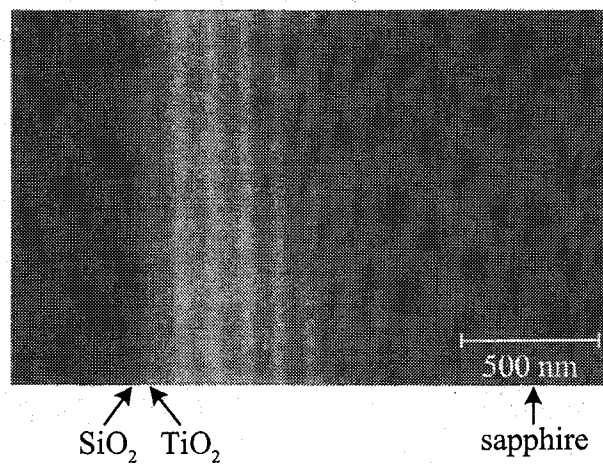
図 4-28 RIEにてサファイア基板を12 hourエッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの断面SEM像



(a) 全体像

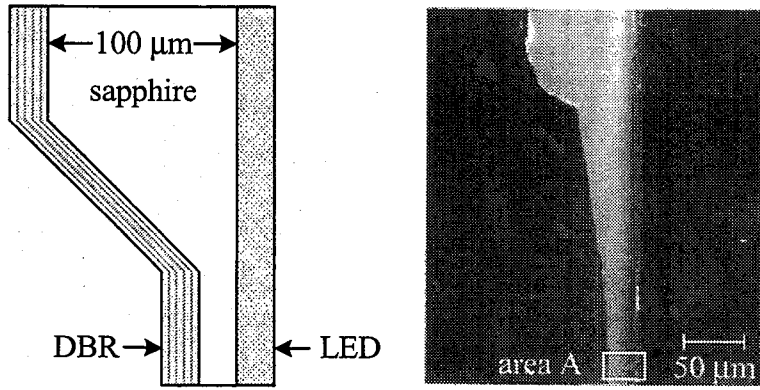


(b) area Aの拡大像

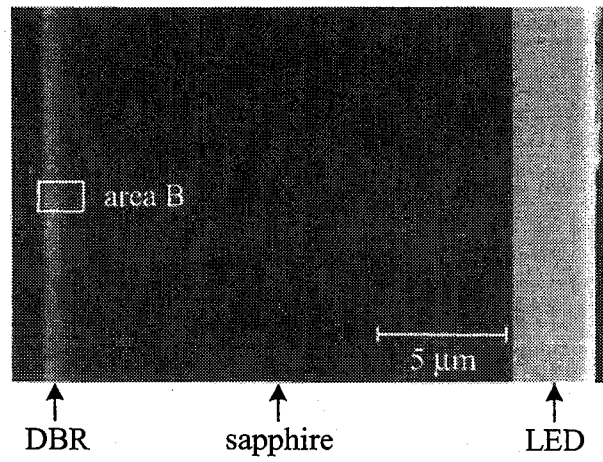


(c) area Bの拡大像

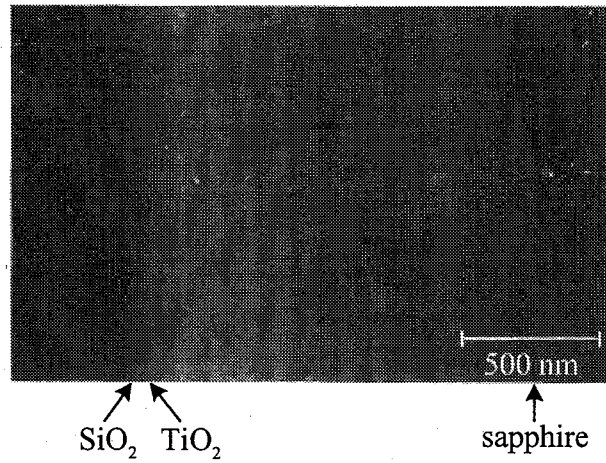
図 4-29 RIEにてサファイア基板を18 hourエッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの断面SEM像



(a) 全体像

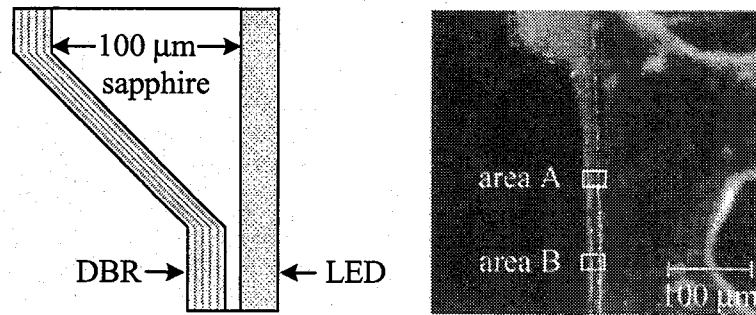


(b) area Aの拡大像

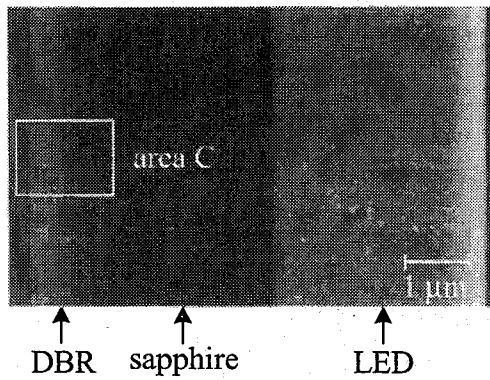


(c) area Bの拡大像

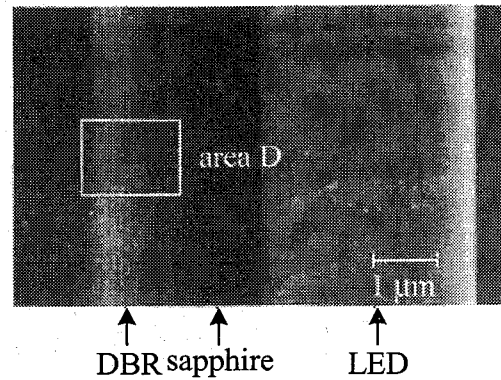
図 4-30 RIEにてサファイア基板を24 hourエッチングし、
TiO₂/SiO₂ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの断面SEM像



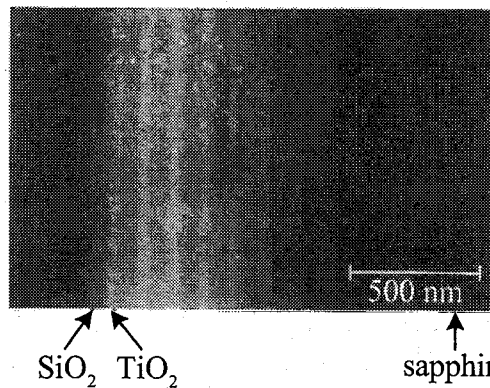
(a) 全体像



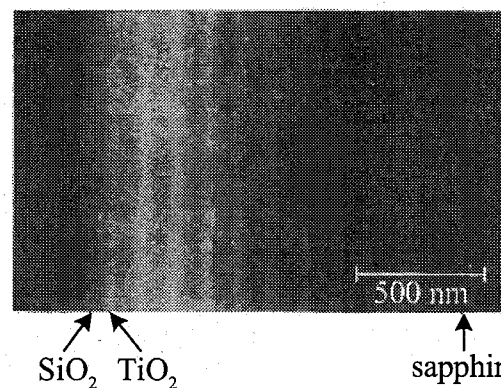
(b) area Aの拡大像



(c) area Bの拡大像



(d) area Cの拡大像



(e) area Dの拡大像

図 4-31 RIEにてサファイア基板を27 hourエッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの断面SEM像

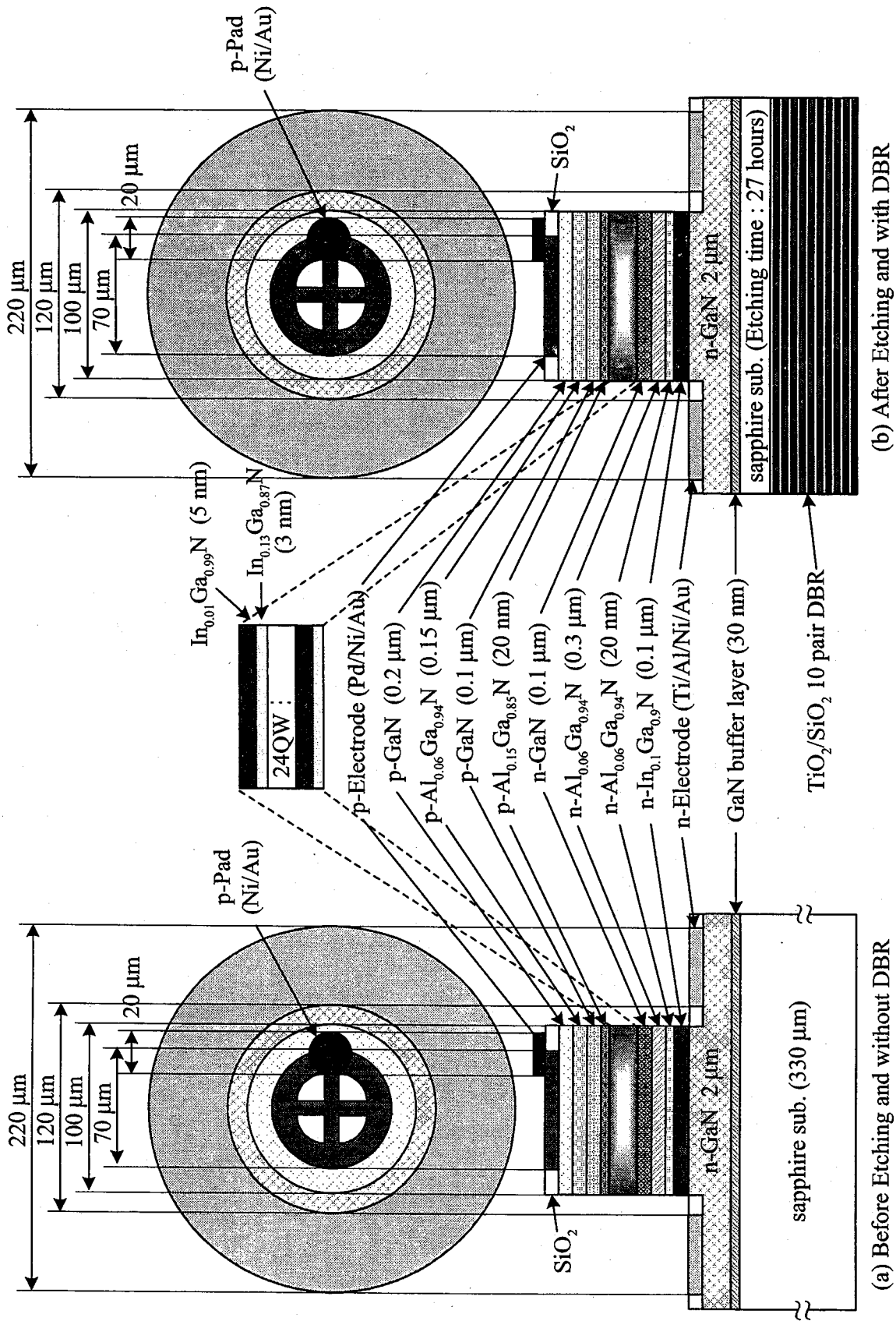


図 4-32 作製した試料の構造図

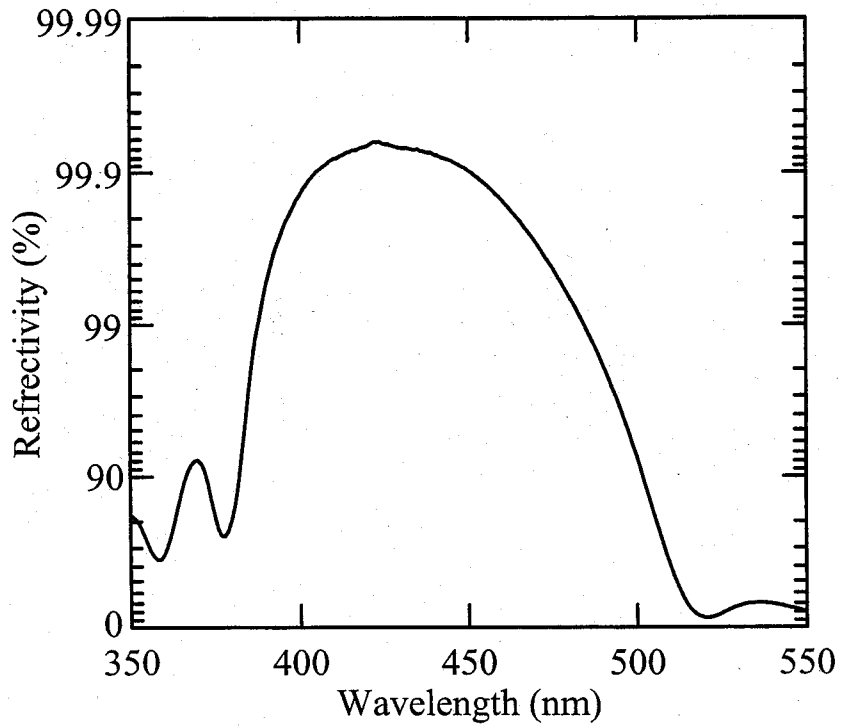


図 4-33 LED に用いた TiO₂/SiO₂ 10 ペア誘電体多層膜反射鏡の反射率測定結果

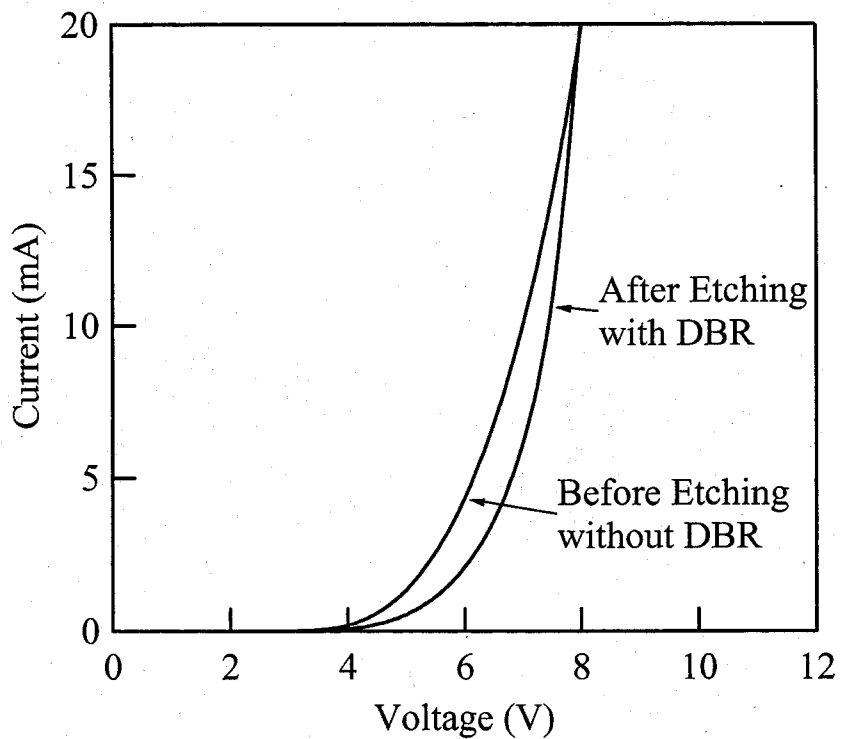


図 4-34 RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし、TiO₂/SiO₂ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-V 特性

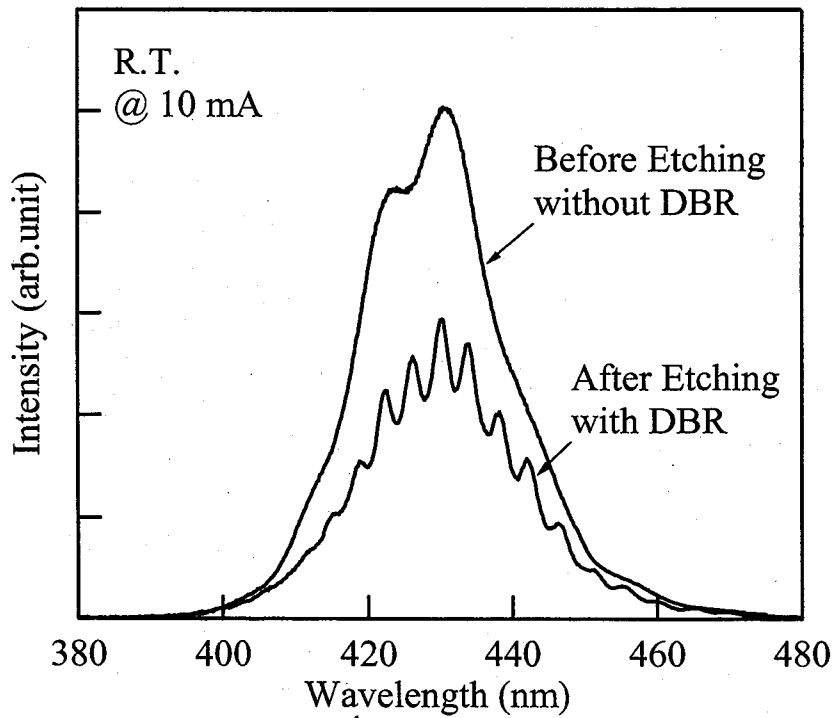


図 4-35 RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の注入電流 10 mA 時における発光スペクトル

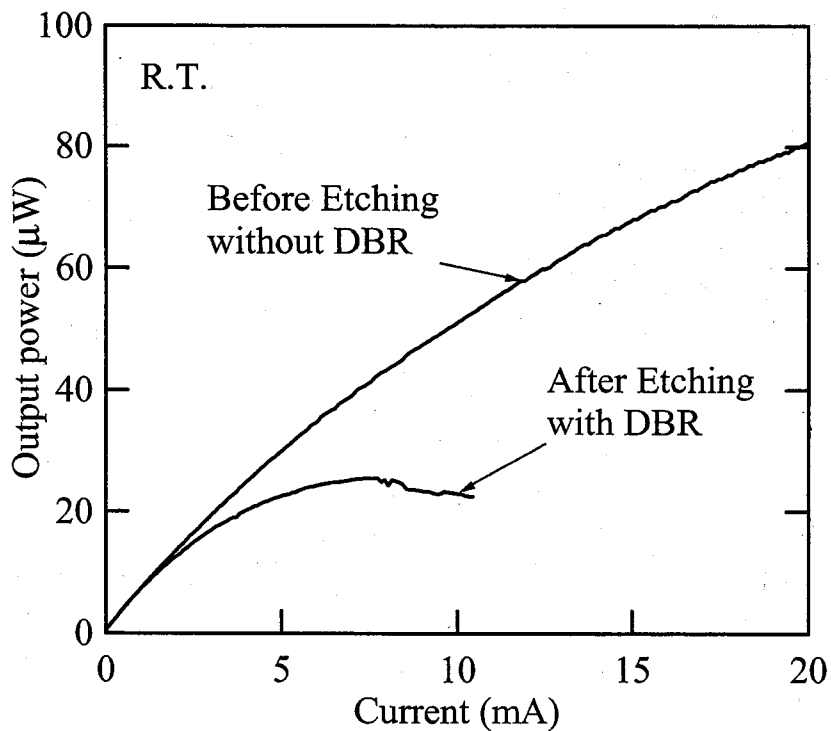
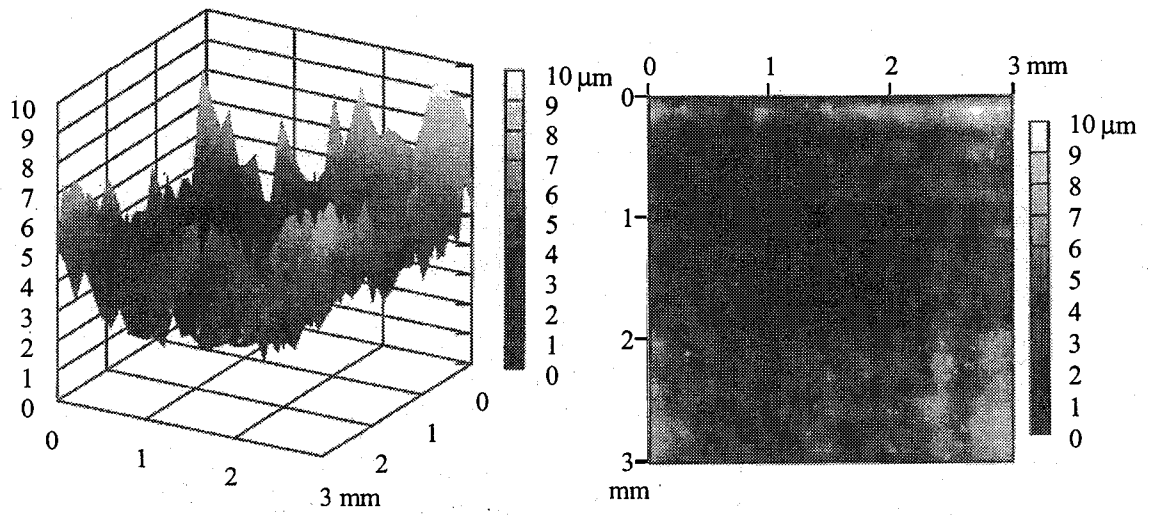
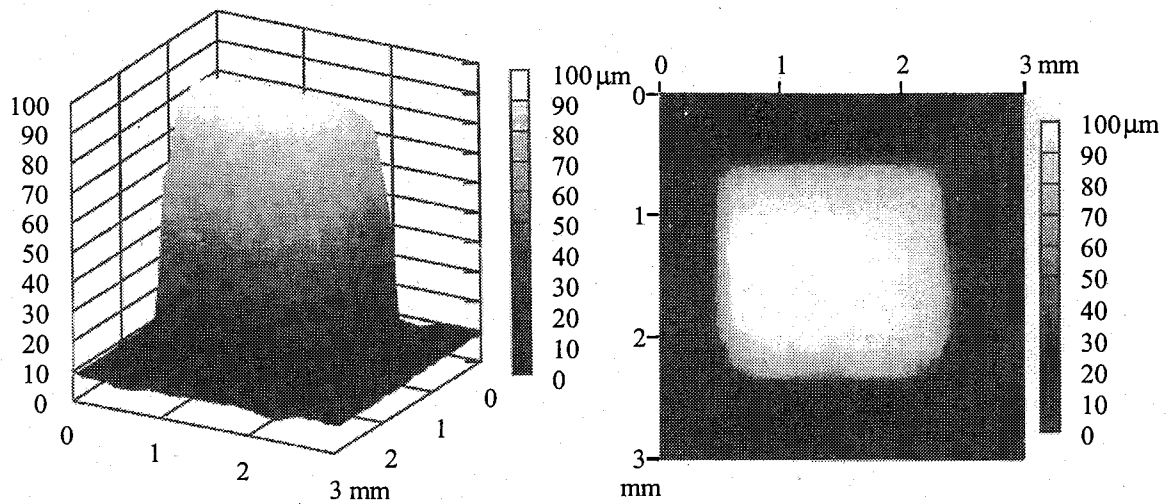


図 4-36 RIE にてサファイア基板を 27 hour エッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10 ペア多層膜反射鏡を形成した LED の I-L 特性



(a) 3次元表示(表面観察像)

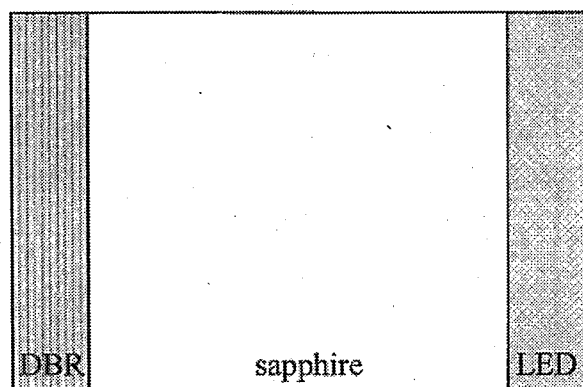
(b) 2次元表示(表面観察像)



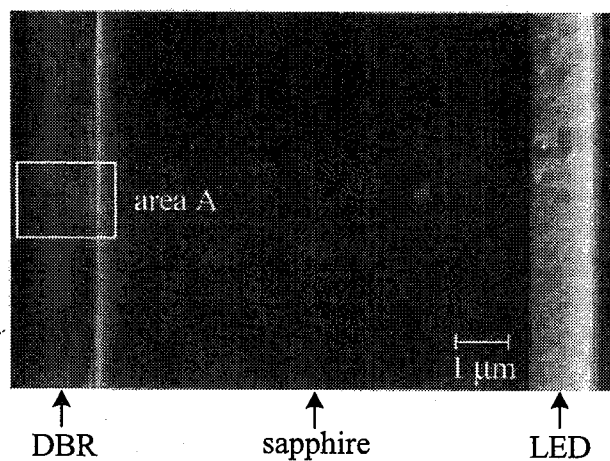
(c) 3次元表示(裏面観察像)

(d) 2次元表示(裏面観察像)

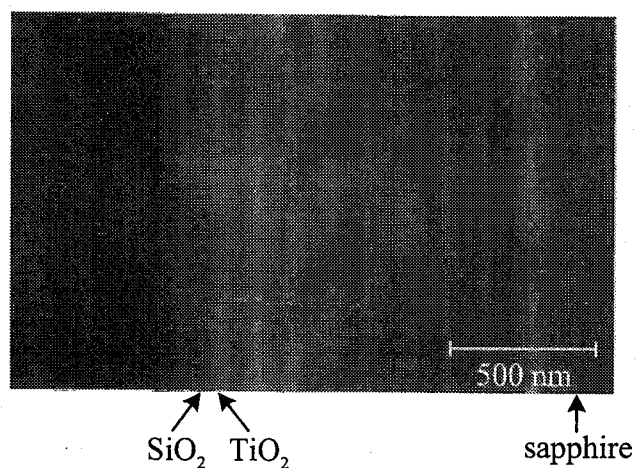
図4-37 RIEにてサファイア基板を27 hourエッチングし、
 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの
 エッチング領域におけるレーザフォーカス変位計測定結果



(a) 構造図



(b) 全体像



(c) area Aの拡大像

図 4-38 RIEにてサファイア基板を27 hourエッチングし、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 10ペア多層膜反射鏡を形成したLEDの断面SEM像