

反応性 rf スパッタ法による a-GaN_xO_y 膜の 光学的・電気的特性*

太田 範雄** 飯田 誠之**

Optical and Electrical Properties of a-GaN_xO_y Films Prepared by Reactive rf Sputtering

Norio OHTA, Seishi IIDA

The films which were prepared at room temperature by reactive rf sputtering of the target of gallium metal in an atmosphere of N₂+Ar were found to show large variation in the absorption in the visible region of the spectrum. The optical gap energies of the films vary from 0.9 eV to more than 4.0 eV corresponding to the preparation condition of nitrogen pressure. Transmission electron diffraction study showed that the films were amorphous alloys composed of gallium, nitrogen and oxygen. Room temperature conductivities change from 10⁻⁶ to 10⁻¹⁰ Ω⁻¹ cm⁻¹. The temperature dependences of conductivities give activation energies of 0.5–0.8 eV. Yellow photoluminescence was observed in films having wide optical gap energies. At present, these variations are believed to be caused by the changes in atomic ratio of gallium, nitrogen and oxygen in the films, but further study is necessary to clarify the origin of these variations.

1. はじめに

アモルファス半導体は結晶と比べて、作成装置が簡単で比較的低温で得られるなどの作成上の容易さや、結晶と異なった特性を示すことなどから種々の応用材料として関心が持たれている。特に Spear と LeComber によってアモルファスシリコン (a-Si) において価電子制御が可能であることが示されて¹⁾からは、基礎物性の研究だけでなく能動素子への応用研究も幅広く行なわれている。その中でアモルファス半導体の応用を可視域を含む光半導体として考えるとすれば、大きな光学ギャップを持つ二元以上の多元のアモルファス半導体を取り上げなければならない。光学ギャップの大きいアモルファス半導体としては、a-SiC:H系²⁾、a-SiN:H系²⁾などのIV族を主体としたもの以外はほとんど検討されていない。そこで我々はIII-V族化合物半導体の一つである窒化ガリウム (GaN) をとり上げてみた。

GaN は結晶状態では光学的には直接遷移形であり大きな禁制帯幅 (室温で 3.5 eV³⁾) を持つため可視部全域での発光が可能な発光素子材料などとして注目されている。単結晶は気相成長³⁾、融液成長⁴⁾などによって作成

されており、基礎研究だけでなく青色発光素子としての実用化⁵⁾も行なわれている。しかし、低抵抗のn型結晶しか得られていなく、p型結晶は得られていない。

結晶で大きな禁制帯幅を持つ GaN がアモルファス状態ではどんな特性を示すかということは非常に興味を持たれる。アモルファス GaN についての報告は、超伝導材料⁶⁾や GaAs の絶縁層材料⁷⁾として幾つかあるが、その特性、特に光学的性質や電気的性質に関してはほとんど明らかにされていない。

上記のような観点から、本報告はアモルファス状態の GaN をとり上げ、その特性がどの程度制御できる可能性があるかを検討することを目的とした予備的なものである。現段階で得られた膜の一部は、窒素と酸素を含んだアモルファスガリウム化合物で、目的とした GaN とは異なるが、非常に大きな光学ギャップを持ち、室温以下で黄色のフォトルミネッセンスを示すなど興味ある特性を示した。また作成条件の違いによって光学ギャップが大きく変化するなど特性が異なる膜が得られることが見いだされたので以下に報告したい。

2. 試料の作成法と特性の概要

膜は、アルゴン (Ar) ガスと窒素 (N₂) ガスの混合ガス中で、石英皿に入れたガリウムを高周波スパッタするこ

* 原稿受付 昭和57年4月12日

** 長岡技術科学大学 (長岡市上富岡町字長峰1803-1)

とによって作成した。図1は膜の作成に用いた高周波スパッタ装置 (Model SFL-200, UPR 製) の概要を示したものである。ベルジャー内をスパッタリングを始める前に、 10^{-5} Torr 以下に引き、ニードルバルブの調節によって各ガスの圧力を設定した。各ガスの圧力の設定には、 10^{-3} Torr 以下は電離真空計 (G-I-T, 日本真空技術製) を、それより高い圧力にはサーモカップル真空計 (MTG-011 日電アネルバ製) を使用した。高周波 (13.56 MHz) 電力は現在のところ 50~80W を用いている。基板は、スライドガラス、石英、単結晶 Si ウェハ、NaCl 結晶を目的に応じて使用した。また基板の加熱および冷却は特に行っていないが、クロメル-アルメル熱電対によるスパッタリング終了直後の基板温度の測定から、放電中の基板温度は 30~50°C であると思わ

れる。

この方法では、投入電力、ガス圧力、Ar と N₂ ガス圧比などを変化させて膜を作成することができる。図2は、高周波電力を約 60 W, Ar と N₂ 混合ガス圧を約 40 mTorr として、N₂ ガスの分圧を変えた時の膜の堆積速度、膜の色、室温での導電率を示したものである。図の右端の結果は N₂ ガスだけを雰囲気ガスとして使用した場合である。ここで示した N₂ ガス圧の範囲では特性が異なる 3 種類の膜が得られている。

N₂ ガス圧が 1 mTorr 以上の領域では、堆積速度は毎分 10 Å 以下と非常に遅く、N₂ ガス圧が増すほど遅くなる傾向がある。得られた膜はすべて透明 (transparent) で、 10^{-9} Ω⁻¹cm⁻¹ 程度の室温導電率を示す。またこの領域では Ar ガス圧が低いと堆積速度は速くなるが特性の変化は見られない。N₂ ガス圧が 8×10^{-4} Torr 以下では、堆積速度は毎分約 100 Å と速く、この場合の膜の色は 5×10^{-4} Torr 以下では茶色 (brown), それ以上では透明感を持った薄茶色 (pale brown) となる。この両種の膜は、後に示す吸収特性やフォトルミネセンスに違いがあるので区別して考える。室温導電率は茶色の膜、薄茶色の膜とも 10^{-8} ~ 10^{-6} Ω⁻¹cm⁻¹ の範囲にある。

このように窒素ガス圧が 1 mTorr 付近を境にして特性に大きな変化が見られる。以後の特性の説明では、この 3 種類の膜を区別するのに、茶色、薄茶色、透明と膜の色を用いる。

膜の表面はどの試料とも滑らかであり、石英、スライドガラスおよび単結晶 Si 基板との密着性は良いが、茶色の膜はアセトン中の超音波洗浄によって一部はがれることがある。透明および薄茶色の膜ではこのようなことはない。

3. 試料の構造と組成

膜の色の違いはあるが、2 μm 程度の膜厚の試料の X 線回折の測定を行なったところ、どの膜でも結晶構造に対応するラインは認められず、いずれの膜もアモルファスであると見なされる。

また透明膜については電子顕微鏡 (JEM-200CT, 日本電子製) を用いて制限視野電子線回折像 (TED パターン) の観察を行なった。NaCl 単結晶上に膜を堆積させ、その後基板を水に溶かし、試料台である Cu メッシュ (直径 3 mm の Cu の網) 上に膜だけを載せて観察を行なった。観測に用いた膜は、高周波電力約 60 W, N₂ ガス圧 3 mTorr, Ar ガス圧 8 mTorr で作成したものであり、膜厚は約 800 Å, 堆積速度は毎分 16 Å であった。この膜は図 2 に示した透明な膜と同じ分類に入る。観測さ

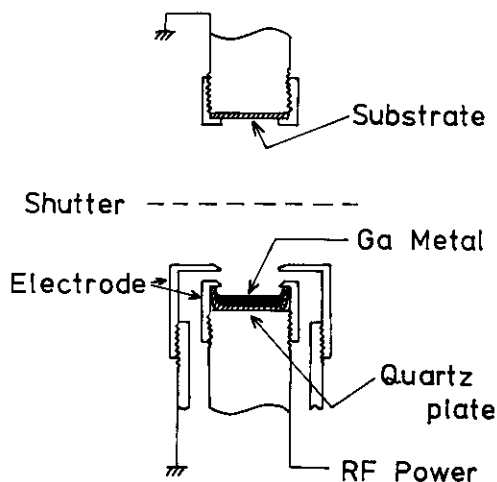


図1 高周波スパッタ装置の概略
雰囲気ガス：アルゴン、窒素

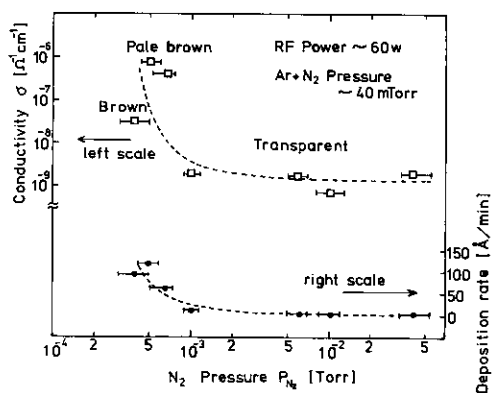


図2 堆積速度および室温導電率の窒素分圧依存性

れた as-deposited の膜の TED パターンを図 3 (a) に示す。アモルファス構造特有のハローパターンを示している。また、この膜は強い電子線の照射 ($\geq 10^{13}/\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}$) によって、図 3 (b) のように結晶化を表わすリングパターンを示す。各リングの直径と測定系の定数を用いて、そのリングに寄与する面の面間隔 d [Å] を算出し、報告されている値との比較によって物質の同定を試みた。TED パターンから算出された d 値とそれに対応すると思われる報告されている物質の d 値を表 1 に示す。表に示されている膜の d 値の 3 桁目は誤差を含んでいる。○印は回折強度が強いリングから算出した d 値であることを示す。また括弧内の数値は X 線回折における回折強度比を示している。回折強度比は、電子線回折と X 線回折とでその構造因子が異なるので、厳密には一致しない。GaN と γ -Ga₂O₃ の d 値は近い値のものが多く、各リングが各々どの物質に対応するかは断定することは不可能であるが、回折強度の弱いリングから算出した d 値において各物質だけのものが見られる。従ってこの膜は as-deposited の状態では酸素と窒素を含んだアモルファス

化合物と見なされる。なおこの時の結晶化した部分の大きさは TEM 像の観測から 50~100 Å 程度と推察される。

また、TED パターンの観測に用いた試料と同じ条件で単結晶 Si 基板に堆積させた 2 μm 程度の膜についてオージェ電子分光分析 (装置: SAM-545M, Physical Electronics Industries 製) を行なった。正確な定量化は行っていないが、装置の感度を考慮した算出では、Ga が全体の約半分を占め、その他はほとんど酸素で占められ、窒素は数 at. % しか入り込んでいないという結果を得た。このことから透明膜はほぼ酸化膜と考えられる。

本研究で作成した膜は酸素を意図的に加えていないにもかかわらず、多量に酸素が混入している。X 線マイクロアナライザー (XMA) (JXA-733, 日本電子製) による測定では Si は検出されなかった。石英皿から混入したことは考えられなく、Ar および N₂ 各ガスとベルジャー内の残留ガス中の酸素がガリウムと反応したものと考えられる。作成条件と酸素混入との関連は 5 章で検討する。

4. 試料の特性

4.1 電気的特性

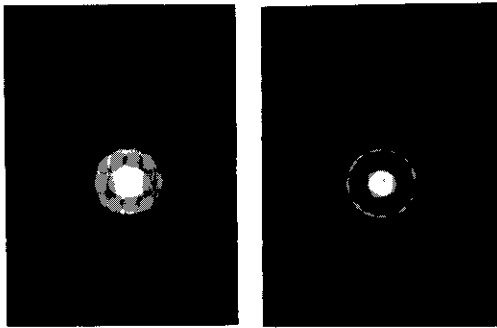
直流導電率の測定には石英またはスライドガラス上に堆積された 600 Å ~ 2 μm の膜厚の試料を用いた。電極は、電極間隔 0.5mm、電極長 10 mm の対向形とし、真空蒸着した Al を用いた。Al 電極と導線 (Cu wire) は銀ペーストにより接続した。±30V の電圧範囲で電極はオーム性を示すことを確認している。

室温導電率は図 2 に示したように茶色および薄茶色の膜では $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ の範囲にあり、一方透明な膜では $10^{-9} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 程度を示す。作成条件と室温導電率の間の詳細な関係は明らかになっていないが、窒素分圧が 1 mTorr 以上で形成される透明な膜の方が室温導電率は低い。

また導電率の温度変化を透明な膜では室温から 400 K までの範囲で、薄茶色の膜では 240 K から室温までの範囲で測定した。この結果を図 4 に示す。透明な膜では測定した全温度領域で測定値は直線にのり、約 0.8 eV の活性化エネルギー (E_a) を持つ。一方薄茶色の膜では約 270 K 以上の温度領域では約 0.5 eV の E_a を持ち、270 K より低い温度では直線からはずれてくる。

4.2 光吸収特性

石英またはスライドガラス基板上に堆積された 1 μm ~ 3 μm の厚さの膜について、光子エネルギーが 1.5 eV



(a) as-deposited (b) μ-crystallized
図 3 膜の電子回折パターン

表 1 観測された d 値とガリウム化合物の d 値の比較

obs.	GaN ⁸⁾	γ -Ga ₂ O ₃ ⁹⁾	β -Ga ₂ O ₃ ¹⁰⁾
2.95			2.97(100)
○2.49	2.43(100)	2.48(100)	
2.08		2.05(20)	
1.61	1.59(90)	1.58(25)	
○1.46	1.46(80)	1.45(70)	
1.27	1.33(70)	1.25(15)	
1.20	1.22(80)		
1.11	1.08(70)		
1.03	1.02(70)		

から 4.4 eV の範囲で、室温において光吸収測定を行なった。光源としてはキセノン放電灯 (75 W) を用いた。それぞれの光子エネルギーにおける吸収係数 (α) は、光路に試料を挿入したときと基板だけを挿入したときの光

強度を、それぞれ I_s および I_0 として、次式によって求めた。

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_s}{I_0} \right) \quad (4.1)$$

ここで d は膜厚である。試料、基板および空気の屈折率に違いによる多重反射の効果は考慮していない。この簡略化により 10^3 cm^{-1} の吸収係数では、多重反射の効果を検討した算出よりも 10% 程度少なく見積ることになる。しかし、ここで議論する範囲では影響ない。

以上の方法によって得られた光吸収スペクトルを図 5 に示す。図中の破線は Hovel and Cuomo によるスパッタ法で作られた多結晶 GaN 膜の光吸収スペクトル¹¹⁾ である。透明膜では可視域においては吸収は認められず、紫外域ではじめて吸収が生ずる。薄茶色および茶色の膜は可視域全域にわたって吸収が生じ、吸収スペクトルは Hovel and Cuomo によるものと比べ非常になだらかなカーブを描く。しかし茶色の膜は薄茶色の膜と比べて可視域において 1 桁吸収係数は高くなっており明らかに両者の吸収特性は異なる。

Davis and Mott¹²⁾ によると、アモルファス半導体の光吸収係数 α は光子エネルギー $h\nu$ と次式の関係で結ばれる。

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_0)^2 \quad (4.2)$$

従って、 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 対 $h\nu$ のプロットは直線になる。その直線の傾きは $B^{1/2}$ となり、外挿値は光学ギャップ (E_0) になる。薄茶色および茶色の膜の吸収係数スペクトルを $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 対 $h\nu$ にプロットしたものを図 6 に示す。この図から求めた E_0 は薄茶色の膜では 2.6~2.9 eV の範囲にあり、茶色の膜では 0.95~1.6 eV の範囲にある。透明膜では現在用いている光学系では高い吸収係数に対応する短波長の光を得ることが不可能なので E_0 は算出できない。しかし吸収係数スペクトルの対応から 4.0 eV 以

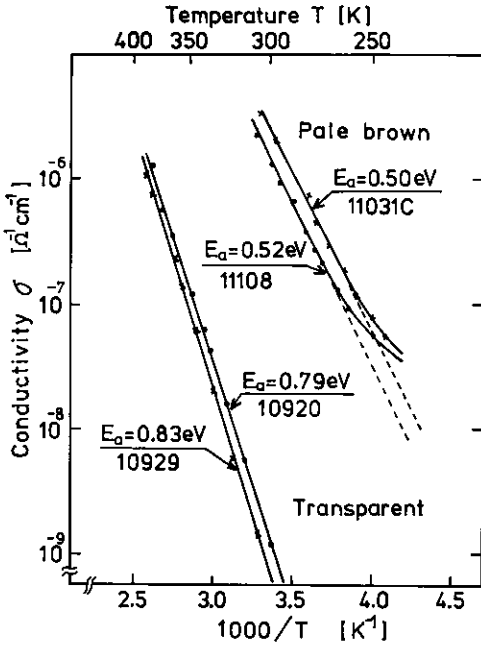


図4 導電率の温度依存性
(左側：透明膜，右側：薄茶膜)

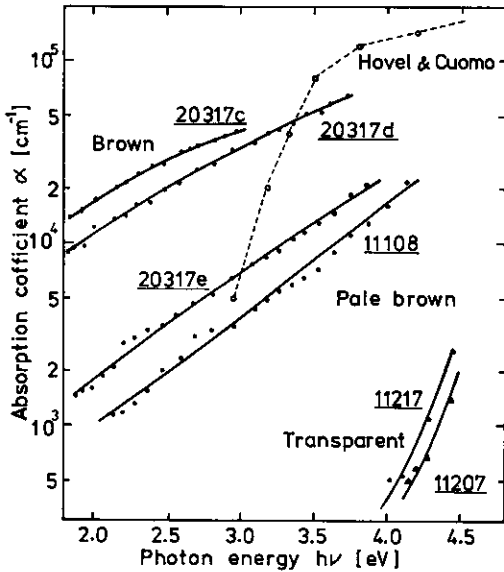


図5 光 吸収係数スペクトル
破線：Hovel and Cuomo による多結晶 GaN の吸収係数スペクトル¹¹⁾

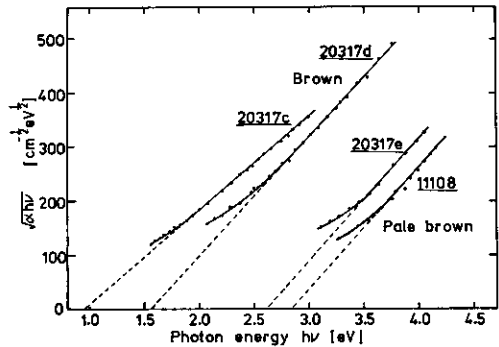


図6 吸収係数 α と光子エネルギー $h\nu$ の $\sqrt{\alpha h\nu}$ 対 $h\nu$ プロット

りも大きいと思われる。このように作成条件によって光学ギャップを変化できることは非常に興味を持たれる。また B 値は、薄茶色の膜では約 $5.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1}$ 、一方茶色の膜では $(3.0 \sim 5.0) \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1}$ 程度でありやや小さい。しかし両種の膜とも他のアモルファス半導体で報告されている値、例えば a-Si の $5.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1}$ ¹³⁾、a-As₂Te₃ の $4 \times 10^5 \text{ cm}^{-1} \text{ eV}^{-1}$ ¹⁴⁾ などよりも約 1 桁小さい。このことは B 値の持つ物理的意味とともに 5 章で検討する。また、幾つかのアモルファス材料において $h\nu$ に対して $(ah\nu)^{1/3}$ や $(ah\nu)$ が直線関係になるという報告¹⁵⁾もあるので、我々の膜について各プロットを行なった。しかし、両方の関係とも $(ah\nu)^{1/2}$ 対 $h\nu$ のプロットほど良い対応はしなかった。

膜の屈折率の値 n を透過光スペクトルに生ずる干渉のピークから次式によって算出した。

$$n = \frac{1}{2d \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (4.3)$$

ただし λ_1, λ_2 は隣りあう干渉のピークの波長であり、 d は試料の膜厚である。透明膜では屈折率は 550 nm 付近の波長では約 2.3、800 nm 付近で約 1.9 である。また薄茶色の膜では 550 nm 付近では約 2.6、800 nm 付近で約 2.4 であり、透明な膜よりも大きな値を示す。茶色の膜は、測定した波長範囲では干渉を示さなかったため、屈折率は算出できていない。

4.3 フォトルミネセンス

透明な膜および薄茶色の膜では室温以下の温度で窒素レーザー光 (337 nm) の励起によって黄色のフォトルミネセンス (PL) を示す。しかし茶色の膜では PL は認められない。

図 7 に透明な膜の 77 K での PL スペクトルを示す。なお測定系は大木と飯田¹⁵⁾ が用いたものと同様である。この PL は約 2.2 eV にピークを示し、半値幅は約 0.7 eV と

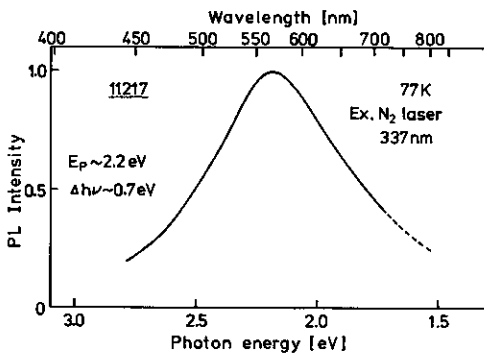


図 7 窒素レーザー光励起による PL スペクトル

非常に広いものである。同様な PL は、超高圧水銀灯の 365 nm 光を励起源として用いた場合も観測される。この場合ピークは若干低エネルギー側に移り、半値幅は小さくなる。なお超高圧水銀灯を用いた場合の励起強度は、N₂ レーザの場合よりも約 4 桁小さい。

薄茶色の膜でも透明膜と同様の PL が観測されるが、強度は弱い。

5. 検討および今後の課題

5.1 膜の組成と作成条件の関係

一般に高周波スパッタ法の場合、雰囲気ガスの圧力、高周波電力の大きさ、基板温度などの作成条件によって、かなり特性の異なる試料が作成されることが報告されている¹⁶⁾。本研究では現在のところ雰囲気ガスの圧力だけを変化させて膜を作成しており、その中で特性の異なる 3 種類の膜が得られている。この要因としては、組成や構造の違いが考えられる。巨視的な構造については、各試料ともアモルファスであることを確認しているが、ダングリングボンドやボイドの存在などの微細構造については、現時点では何の情報も得られていない。ここでは組成について作成条件との関係を検討する。

窒素ガス圧が 1 mTorr 以上で得られる透明な膜は、3 章で示したように、オージェ電子分光分析から酸素を多量に含んでいる。従ってここで用いた作成条件では、窒素に比べて量的に少ない雰囲気ガス中の酸素 (O₂/N₂ < 0.005) が膜中に多く混入すると思われる。我々と類似した方法 (雰囲気ガスは窒素だけを用いている) で作成を行なった松下ら¹⁷⁾ によると、窒素ガス圧が高いと酸素が混入しやすく、低い窒素ガス圧で大きな高周波電力を用いると酸素の混入は少なくなるという報告している。この理由として松下らは「ガス圧の高い時には平均自由行程が短くガスが十分なイオン化エネルギーを得られず、イオン化ポテンシャルの小さい酸素の方がイオン化されやすい。一方ガス圧が低い時は、平均自由行程が長くなるため窒素も多くイオン化され、酸素の混入が相対的に減少する」と考えている。我々の試料も同様な理由で酸素が混入していると考えられる。しかし、松下らの膜では 10⁻¹ Torr と我々の場合よりも高い窒素ガス圧にもかかわらず、膜中に占める窒素に対する酸素の比は 0.6 と、我々の膜よりも酸素は混入していない。これは用いた高周波電力の大きさの違いによるものと思われる。我々が窒素ガスだけを雰囲気ガスとして用いた時は 3 × 10⁻² Torr 付近以下のガス圧では放電しないが、松下らの場合は 4 × 10⁻³ Torr でも放電している。このことから、我々の膜の方が酸素を多く含んでいるのは、電力が小さ

いため窒素はイオン化されにくく、従ってイオン化されやすい酸素の方が多くガリウムと反応したためと思われる。

(3~8) × 10⁻⁴ Torr と低い窒素分圧で得られる茶色および薄茶色の膜については、現在のところオージェ電子分光分析の結果がでていないので、組成については明らかではない。しかしXMAの測定では、ガリウム、窒素、酸素以外の元素は検出されていないので、組成の面ではこの3つの元素の構成割合によって、特性が異なるものが得られているものと思われる。これらの膜は窒素ガス圧が低い場合に得られており、先の松下らの報告から考えると窒素が透明膜に比べて多く取り込まれている可能性はある。また、我々より投入電力が大きいが、ほぼ同じ条件で同じ方法で膜を作成した大矢と小野寺によると⁹⁾、低い窒素分圧(4 × 10⁻⁴ Torr 以下)で形成される膜はアモルファスガリウムに近いものであることを報告している。これら二つの報告から、茶色および薄茶色の膜は透明な膜と比べて、窒素が多く膜中に入り込んでいるか、それとも、ガリウムリッチな組成になっているかの両方の可能性が考えられる。しかし、大矢と小野寺による膜の抵抗率は5 × 10⁻⁸ Ω・cmで、彼らと同じ窒素分圧で作成した我々の膜の抵抗率約10⁶ Ω・cmよりも非常に小さくなっている。従って現在のところ、我々の茶色および薄茶色の膜はアモルファスガリウムに近いものではないと考えている。図2に示したように低い窒素分圧では、堆積速度は透明膜に比べて10倍程度速い。このことは、雰囲気ガス中に多量に入っている窒素と、スパッタされたガリウムが反応したためとも考えられるが、組成に関する直接的な証拠はないので断定はできない。また、これらの試料の赤外吸収スペクトルは透明膜と異なる様子を示すが、スペクトル中に見られる吸収帯の同定が明らかになっていないので、今後オージェ電子分光分析とともに検討していきたい。

5.2 膜の光学的特性

4章において本研究で得られた膜の電気的光学的特性についての測定結果を示した。現段階ではこれらの結果からこの膜の詳細な評価を行なうことは難しいが、光学的特性を中心に若干の検討を加える。

4.2節に示したように茶色および薄茶色の膜の(4.2)式で定義される B 値はa-Si¹³⁾やa-As₂Te₃¹⁴⁾などで報告されている値よりも約1桁小さい。 B 値は他の物理量との関係において次式によって表わすことができる¹⁵⁾。

$$B = \frac{(4\pi/nc)\sigma_0}{\Delta E} \quad (5.1)$$

ここで n は膜の屈折率、 c は光速、 σ_0 は最小金属的伝導

度、 ΔE は $(E_g - E_0)/2$ で与えられる量でバンドテイルの広がりを表わす。 E_g は移動度ギャップ、 E_0 は光学ギャップである。a-Siを比較のために例をとって大まかに数値を検討してみる。 n はa-Siの場合約4.0で我々の試料では4.2節で示したように約2.5であり、 n の違いでは B 値の違いは説明できない。 σ_0 を両者の場合ともほぼ同じと考える B 値の違いは ΔE の違いによることになる。すなわち我々の膜はa-Si、a-As₂Te₃などに比べて、バンドテイルが広がっていることに対応すると考えられる。また、大木と飯田によるa-C:H¹⁵⁾では我々と同程度の B 値を報告している。

図7に示した透明な膜のフォトルミネッセンス(PL)は、約2.2 eVにピークを示し、3.0 eV付近の光子エネルギーまで発光が生じているが、吸収は4.0 eV付近から立ち上っている。また光学ギャップが2.6~2.9 eVの値を持つ薄茶色の膜でも、透明膜と同様なPLが観測された。これらの点を考えると、このPLの輻射遷移はバンド端に関連した準位ではなく、両種の試料に共通な準位が存在するものと考えられる。しかし発光機構については今後さらに検討を加える必要がある。

6. おわりに

以上述べたように、作成条件の違いによって光学ギャップが0.9 eV付近から4.5 eV付近にわたる広範囲の変化を示した。これはガリウム、窒素、酸素の構成割合の違いによるものと思われる。このように大きな範囲にわたって光学ギャップおよび吸収係数を変化させることは、応用的な見地からも非常に興味ある対象である。また一部の膜は室温以下で黄色のフォトルミネッセンスを示した。

現段階では作成条件と光学ギャップの間の関係をまだ十分把握しているとはいえないので、今後さらに検討の必要がある。また酸素混入をさけるためには、雰囲気ガスとして、窒素の代わりにアンモニアを使うことを考えてみたい。さらに、アモルファス膜の熱的安定性についての検討も加えていきたい。

謝 辞

電子線回折の測定についてお世話になった機械系弘津助教に謝意を表します。またオージェ電子分光分析において、装置の使用を許可して頂いた機械系中村教授ならびに測定を行なって頂いた機械系大学院生菅井君に謝意を表します。ならびにX線回折およびXMAの測定を行なって頂いた電気系大学院生下川君に感謝いたします。

文 献

- 1) W. E. Spear and P. G. LeComber: Solid State Commun. 17 (1975) 1193.
- 2) D. A. Anderson and D. E. Spear: Philos. Mag. B35 (1976) 1.
- 3) H. P. Maruska and J. J. Tietjen: Appl. Phys. Lett. 15 (1969) 327.
- 4) R. Madar et al.: J. Crystal Growth 31 (1975) 187.
- 5) 大木芳正ほか: 第42回応物講演会予稿集 (1981) 555.
- 6) 大矢銀一郎, 小野寺大: 第39回応物講演会予稿集 (1978) 168.
- 7) T. Hariu et al.: Appl. Phys. Lett. 32 (1978) 252.
- 8) Powder Diffraction File: ed. JCPDS, (1974) 2-1078.
- 9) Powder Diffraction File: ed. JCPDS, (1970) 20-426.
- 10) Powder Diffraction File: ed. JCPDS, (1972) 11-370.
- 11) H. J. Hovel and J. J. Cuomo: Appl. Phys. Lett. 20 (1972) 71.
- 12) E. A. Davis and N. F. Mott: Philos. Mag. B22 (1970) 903.
- 13) M. H. Brodsky et al.: Phys. Rev. B 1 (1970) 2632.
- 14) K. Weiser and M. H. Brodsky: Phys. Rev. B 1 (1970) 781.
- 15) 大木茂久, 飯田誠之: 長岡技科大研究報告 3 (1981) 43.
- 16) D. A. Anderson and William Paul: Philos. Mag. B44 (1981) 187.
- 17) 松下浩一ほか: 第28回応物連合講演会予稿集 (1981) 265.
- 18) N. F. Mott and E. A. Davis: *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. (Clarendon press. Oxford, 1979) p. 289.