

エピフィルムボンディングによる 高放熱LEDアレイ

鷺森 友彦 武藤 昌孝
藤原 博之 荻原 光彦

近年、高精細・高速印刷のオフィスプリンタ用途で発光ダイオード（LED）を書込み光源とするデジタルLEDプリンタの需要が急速に高まりつつある。デジタルLEDプリンタのキー部品である光書込みヘッド（LEDプリントヘッド）は、微小面積の発光部を高密度に配列したLEDアレイが光源の役割を担っている。たとえば、A4印刷幅の1,200dpi（dots per inch：1インチ当りの印刷画素数）の場合、発光部の面積は約 $8\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}$ 、LEDの配列ピッチは約 $21.2\mu\text{m}$ 、集積LED数は約10,000ドットである。

LEDでは、pn接合を介して注入されたキャリア（電子、正孔）が再結合して光が発生する。注入キャリアの再結合によって光が発生する「発光再結合」の他に、注入キャリアが再結合しても光が発生しない「非発光再結合」が存在する。非発光再結合では、光の代わりに熱が発生する。LEDの動作に伴って発生する熱はLEDの温度上昇の要因となる。LEDの温度上昇は発光効率の低下をまねき、さらなる温度上昇要因となる。

デジタルLEDプリンタでは、LEDプリントヘッドのLED配列密度を高くしてLED数を増やすことによって印刷の高精細化を図る。また、LEDプリントヘッドのLED動作電流を増やして1個のLED当りの光量を増やすことによって印刷の高速化を図る。したがって、印刷の高精細化や高速化は、LEDプリントヘッドの温度を上昇させる方向に働く。つまり、高精細・高速LEDプリントヘッドを作るためには、LEDの放熱性を高め、LEDの温度上昇を防止するための技術開発が重要である。

本稿では、LEDプリントヘッドで使うLED材料を取り上げ、高放熱構造LEDアレイを実現する独自の新しい『ものづくり』技術について述べる。

高放熱構造LEDの技術開発

高いLEDの放熱性を得るためには、LEDの発光領域と高い熱伝導率を持つ材料の基板（高熱伝導基板）との距離をできるだけ短くして、主として発光領域で発生した熱を高熱伝導基板に速く伝える必要がある。したがって、発

光領域をできるだけ高熱伝導基板に近接することが望ましい。本章では、独自に開発した「エピフィルムボンディング」技術を使って、単結晶半導体薄膜を高熱伝導基板上に直接接合することによって、発光領域と高熱伝導基板との距離を約 $1\mu\text{m}$ の距離に近接した高放熱構造LEDを実現する技術について述べる。

高放熱構造LEDアレイの構造

本節では、高放熱構造LEDアレイの構造について述べる。

LEDの作製では、母材基板上に有機金属気相成長法（MOCVD法）などの半導体結晶成長技術を使って母材基板上に成長した単結晶半導体層（以下、LED薄膜層と呼ぶ）を使う。LED薄膜層の厚さは約 $2\mu\text{m}$ で、発光層は、LED薄膜層の表面から $1\mu\text{m}$ 程度の距離に位置する。したがって、LED薄膜層を母材基板から剥離して高熱伝導基板上に直接接合することができれば、発光領域と高熱伝導基板との距離が約 $1\mu\text{m}$ と、発光領域と高熱伝導基板が極めて近接した構造をつくることができる。

LEDプリントヘッドに使うLEDアレイのように、集積された多数のLEDをそれぞれ独立して駆動制御する素子では、各LEDが互いに電氣的に素子分離されていることが必要である。高熱伝導基板材料としては、Si基板や金属基板などの材料を挙げることができる。高熱伝導基板として金属基板を使用する場合には、LED薄膜層と高熱伝導基板との間に熱伝導が高い絶縁膜（高熱伝導絶縁膜）を設けることによって、LEDで発生した熱の高熱伝導基板への伝導を妨げることなくLEDと高熱伝導基板との絶縁性を確保することができ、各LED間の素子分離が容易になる。

図1に、以上述べた高放熱構造LEDアレイの構造を模式的に示す。図1に示すように、高熱伝導基板上に高熱伝導絶縁膜を設け、高熱伝導絶縁膜上にLED薄膜を直接接合する構造である。この構造によって、LEDで発生した熱は高熱伝導絶縁膜を介してすばやく高熱伝導基板に伝わり、高熱伝導基板によって効率よく熱を散逸することが期待できる。

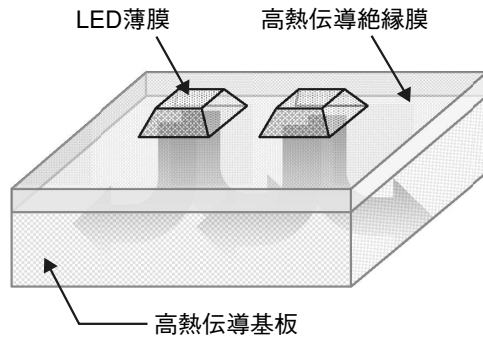


図1 高放熱構造LEDの概念図

高放熱構造LEDを実現する技術

本節では、「エピフィルムボンディング」技術^{1) 2)}を使った高熱伝導絶縁膜／高熱伝導基板上へのLED薄膜層の接合技術について述べる。

(1) 高熱伝導基板上へのLED薄膜層の接合プロセス

図2に、母材基板から半導体単結晶薄膜を剥離して異種材料基板上に分子間力によって接合する「エピフィルムボンディング」技術を使った、高熱伝導絶縁膜／高熱伝導基板上へのLED薄膜層の接合プロセスの概要を示す。

(a) LEDプリントヘッドに使うLED薄膜層の材料は $Al_xGa_{1-x}As$ (x はAlの組成比) で、 $Al_xGa_{1-x}As$ 層を成長するための母材基板はGaAs基板である。LED薄膜層の厚さは、約 $2\mu m$ である。LED薄膜層とGaAs基板の間には、あらかじめLED薄膜層を剥離するための犠牲層を設ける。発光層は表面から約 $1\mu m$ に位置する。ここで、あるエッチング液でLED薄膜層および母材基板はエッチングされないが、犠牲層とした層だけがエッチングされるような半導体層を犠牲層と呼ぶ。

(b) LED薄膜層に犠牲層を露出するような所定の島状パターンを形成し、適当なエッチング液を使って犠牲層のみをエッチングして、LED薄膜層をGaAs基板から剥離する。

(c) 高熱伝導絶縁膜を形成した高熱伝導基板を準備しておき、表面を前処理した高熱伝導絶縁膜／高熱伝導基板上に、LED薄膜層を加圧・密着させ、LED薄膜層を高熱伝導絶縁膜上に接着剤を使わずに直接接合する。

(d) 高熱伝導絶縁膜／高熱伝導基板上に接合したLED薄膜層を個別のLEDに素子分離し、層間絶縁膜と電極・配線を形成してLEDアレイの作製を完了する。

以上述べた、LED作製プロセスにおける (a) から (c)

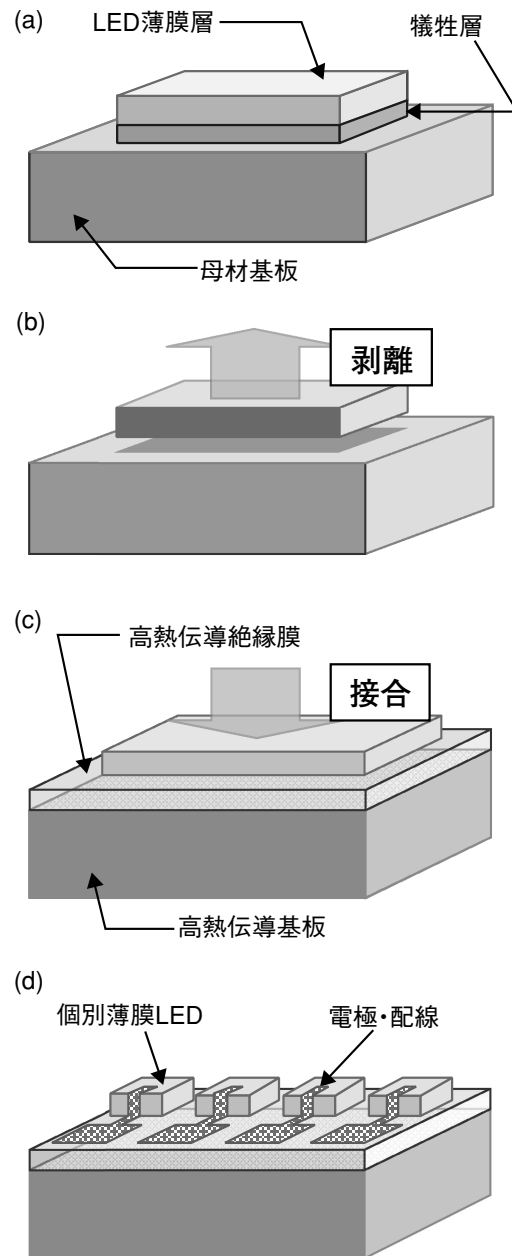


図2 高熱伝導基板上へのLED薄膜層の接合プロセスおよび薄膜LEDアレイ作製プロセス

まで (LED薄膜層をGaAs層から剥離し、高熱伝導基板上の高熱伝導絶縁膜層に接着剤を使用せずに直接接合する工程) を「エピフィルムボンディング」工程と呼ぶ。

(2) LED薄膜を接合する高熱伝導絶縁膜の選択

本節では、上記エピフィルムボンディングを使ったLED薄膜層の高熱伝導絶縁膜／高熱伝導基板上の接合構造を実現するために重要な鍵を握る高熱伝導絶縁膜の選択について述べる。

エピフィルムボンディングを使って、接着剤を使用せずにLED薄膜を高熱伝導絶縁膜／高熱伝導基板上に接合するには、LED薄膜層と高熱伝導絶縁膜表面に働く分子間力を利用する。分子間力は、分子がナノメートル・オーダーに近接することによって分子間に働く力であるため、LED薄膜層と高熱伝導絶縁膜を分子間力によって接合（分子間力接合）するためには、LED薄膜層を接合する高熱伝導絶縁膜表面にナノメートル・オーダーの平坦性が必要である。そのためにはまず、高熱伝導絶縁膜表面を形成する高熱伝導基板が、ナノメートル・オーダーの平坦性を備えていることが必要である。基板上に形成する薄膜では基板表面の凹凸を平坦化することはできない。薄膜表面の凹凸は基板の凹凸を反映するためである。さらに高熱伝導絶縁膜が、材料の性質としてナノメートル・オーダーで平坦な表面形成が可能な材料であることが要求される。その上で、ナノメートル・オーダーの平坦面を持つ高熱伝導絶縁膜形成技術の確立が必要である。本稿では、高熱伝導基板のナノメートル・オーダーの平坦加工技術とナノメートル・オーダーの平坦面を持つ高熱伝導絶縁膜形成技術については触れず、以下、ナノメートル・オーダーで平坦な表面形成が可能な材料の選択について述べる。

平坦な表面を持つ薄膜形成と高い熱伝導が期待できる薄膜材料として、ダイヤモンドライクカーボン（Diamond-Like Carbon：DLC）に着目した。まずエピフィルムボンディングを使ったDLC薄膜上のLED薄膜の接合を調べるために、高熱伝導基板としては、市販されている状態で既にナノメートル・オーダーの平坦面を持つSi基板を使用し、Si基板上に形成したDLC薄膜上へのLED薄膜の接合を試みた。

Si基板上に化学的気相成長法（Chemical Vapor Deposition：CVD法）によって形成した約100nm厚さのDLC薄膜表面の平坦性を原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope：AFM）を使って評価した。図3にSi基板上に形成したDLC薄膜表面粗さをAFM（評価エリア：5 μm ×5 μm ）を使って評価した結果を示す。図3に示すように、AFMの測定領域でDLC薄膜の R_{pv} （山-谷の高低差）は約1nmである。このDLC薄膜は、平坦性の観点からは分子間力接合に適した平坦性を備えた薄膜であると言える。

Si基板上に形成したDLC薄膜の表面が分子間力接合に適した平坦性を備えた表面であることが確認できたので、DLC薄膜／Si基板上にLED薄膜の接合を試みた³⁾。

図4は、DLC薄膜／Si基板上に短冊状のLED薄膜（幅：約300 μm 、長さ：約1.3mm）を接合した状態の顕微鏡写真である。図4に示すように、顕微鏡観察では、LED薄膜

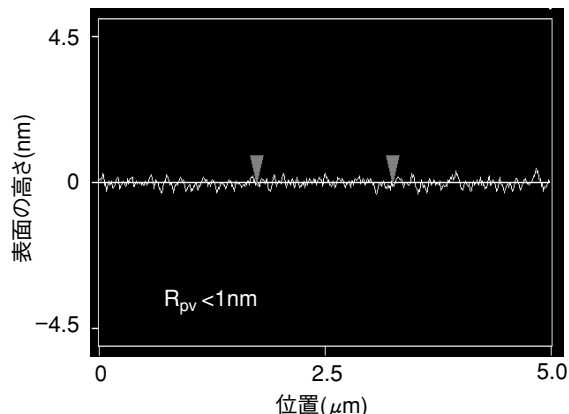


図3 Si基板上に形成したDLC薄膜のAFMを使った表面粗さの測定

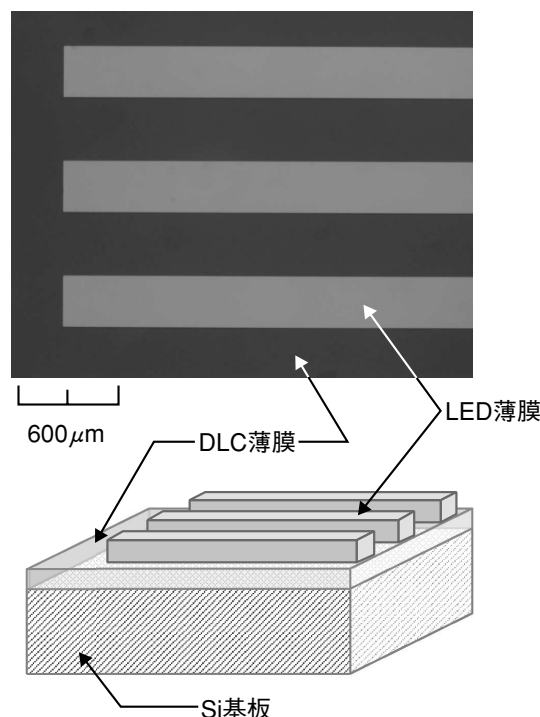


図4 DLC薄膜／Si基板上に短冊状のLED薄膜（幅：300 μm 、長さ：1.3mm）を接合した状態の顕微鏡写真

はDLC薄膜／Si基板から剥がれることなくDLC薄膜／Si基板上に良好な状態で接合されていると言える。

さらにLED薄膜のDLC薄膜上の接合状態を確認するために、接合したLED薄膜を10 μm ×10 μm 、ピッチ＝21.2 μm （1,200dpiの配列密度に相当するピッチ）のLED薄膜アレイに加工した。接合したLED薄膜アレイの加工では、標準的なフォトリソグラフィー・プロセスとエッチング・プロセスを使った。

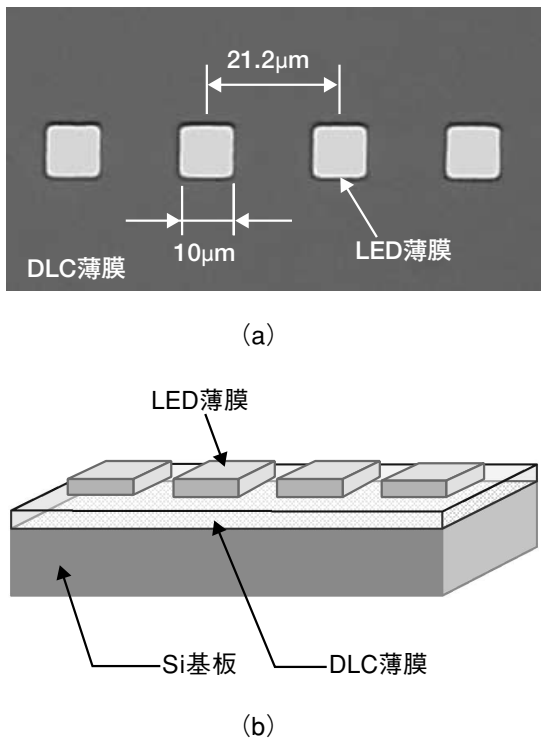


図5 (a) : DLC薄膜/Si基板上に接合したLED薄膜アレイの顕微鏡写真 (サイズ: $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 、ピッチ: $21.2\mu\text{m}$)
(b) : (a) の構造を示す模式図

図5(a) は、サイズ: $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 、ピッチ: $21.2\mu\text{m}$ のLED薄膜アレイの顕微鏡写真である。図5(b) は図5(a) で示した像の構造を模式的に示した図である。

LED薄膜のDLC薄膜上の接合状態が悪い場合には、接合したLED薄膜を加工する際に接合界面へ薬液が浸透したり、加工プロセス中の加熱工程で熱膨張の影響を受けて、LED薄膜が剥離する。接合面積が小さい程、接合面に働く合計の接合力が減少するため、接合面積が小さいLED薄膜であるほどDLC薄膜/Si基板から剥離しやすくなる。図5で見られるように、DLC薄膜/Si基板上の $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ の微小LED薄膜アレイでは、LED薄膜のサイズが $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ の微小サイズであるにもかかわらず、良好な状態でDLC薄膜/Si基板上に接合されている。接合したLED薄膜を微小LED薄膜アレイへ加工した後、 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ の微小サイズのLED薄膜が、DLC薄膜/Si基板から剥離や浮きが発生せずに良好な接合状態を維持していることは、図4に示した矩形のLED薄膜のDLC薄膜/Si基板上の接合状態がLED薄膜の接合面全体にわたり良好であり、LED薄膜はDLC薄膜/Si基板上に強固に接合できていることを示唆している。

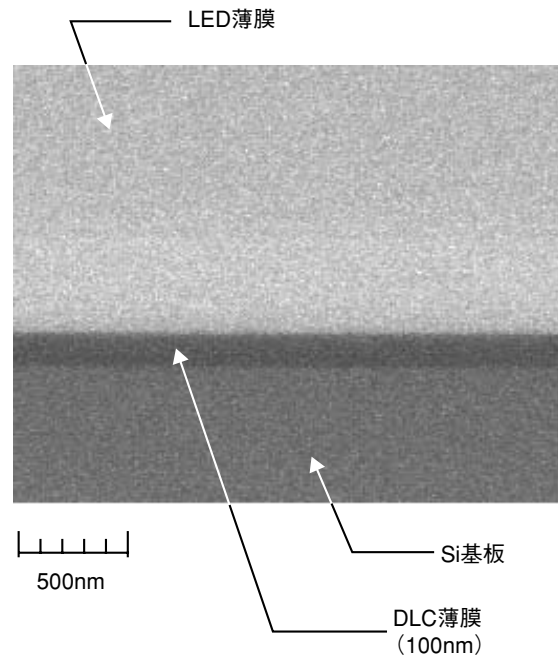


図6 エピフィルムボンディング技術を使ってLED薄膜をDLC薄膜/Si基板上に接合したサンプルのLED薄膜とDLC薄膜の接合界面付近の断面SEM像

LED薄膜とDLC薄膜/Si基板の間の接合状態をさらに詳しく観るために、接合界面付近の断面電子顕微鏡像 (Scanning Electron Microscope : SEM像) を観察した。図6は、エピフィルムボンディング技術を使ってLED薄膜をDLC薄膜/Si基板上に接合したサンプルのLED薄膜とDLC薄膜の接合界面付近の断面SEM像を示している。図6に示したように、LED薄膜とDLC薄膜の間には隙間は観察されず、観察したSEM像の領域全体にわたりLED薄膜がDLC薄膜/Si基板に密着している。

従来、DLC薄膜は面と面の摩擦力を減少させたり、面と面が接合することを防止するために使用されてきた。この観点から今回、従来のDLC薄膜の使い方とは正反対の使い方である、面と面の接合にDLC薄膜を応用できることをはじめて示した価値は大きいと言える。

上記、LED薄膜をDLC薄膜/Si基板上に接着剤を使わずに接合 (分子間力接合) できることをはじめて実証した。このことにより、エピフィルムボンディングによってLED薄膜を分子間力接合する接合層として、熱伝導率が高いDLC薄膜を使うことができ、DLC薄膜/高熱伝導基板上にLED薄膜を直接接合した構造で高い放熱特性を実現できる道が開かれた。

DLC薄膜/Si基板上に接合した薄膜LEDの特性

本章では、エピフィルムボンディングによってDLC薄膜/Si基板上に直接接合したLED薄膜を使って作製した、1,200dpi-薄膜LEDアレイのLED電流-LED温度特性 (I_F - T_{LED} 特性) とLED電流-光量特性 (I_F - P_{LED} 特性) に注目し、LED薄膜/DLC薄膜/Si基板の放熱性とその I_F - P_{LED} への効果について述べる。

(1) I_F - T_{LED} 特性

図2で概要を述べたエピフィルムボンディングを使った薄膜LEDアレイ作製プロセスにしたがって、DLC薄膜/Si基板上に矩形(短冊形状)のLED薄膜を接合した後、接合したLED薄膜を加工して1,200dpi-薄膜LEDアレイを作製した。

各LEDの発光部のサイズは $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ とした。DLC薄膜/Si基板上に直接接合したLEDの放熱性と比較するため、熱伝導率が低い材料の例としてポリイミド層(PI層)を取り上げ、薄膜LEDとDLC薄膜/Si基板の間に $2\mu\text{m}$ 厚さのPI層を設けた1,200dpi-薄膜LEDアレイ(発光部のサイズは $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$)も作製した。

図7に、DLC薄膜/Si基板上に直接接合したLEDの I_F - T_{LED} 特性を示す。 T_{LED} は、LEDの発光波長がLED温度にしたがって変化する特性から実験的に見積もった。図7には、PI層($2\mu\text{m}$)/DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDの I_F - T_{LED} 特性も示す。図7に示すように、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDでは、 I_F の増加に伴うLED温度上昇は緩やかで、 $I_F=10\text{mA}$ の大きな電流を流した場合であってもLEDの室温からの温度上昇は約 30°C と小さく、LEDで発生する熱の放熱性が高い結果を得た。さらに I_F を増加しても急激なLED温度の上昇は観られない。一方、PI層($2\mu\text{m}$)/DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDでは、LEDの温度は I_F の増加に伴って急速に上昇し、 $I_F=10\text{mA}$ ではLEDの室温からの温度上昇は約 180°C と大きく、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDの場合と比較して約6倍のLED温度上昇を示した。

上記、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDでは放熱性が高く、大きな I_F 領域であってもLED動作時の温度上昇が小さいことを検証した。ここで重要な点は、LEDの高い放熱性を実現することによって、LEDの発光効率にどのような効果をもたらすが、である。次節では、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDの I_F - P_{LED} 特性について述べる。

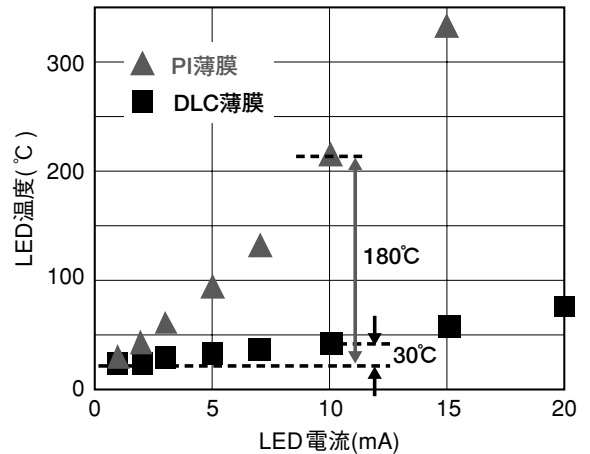


図7 DLC薄膜/Si基板上に直接接合したLEDの I_F - T_{LED} 特性

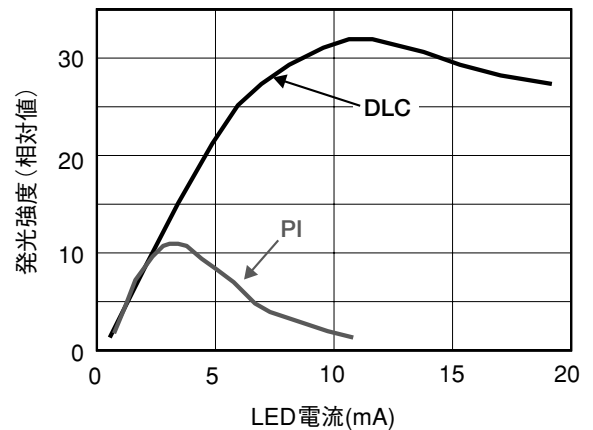


図8 DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDの I_F - P_{LED} 特性

(2) I_F - P_{LED} 特性

図8に、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した薄膜LEDの I_F - P_{LED} 特性を示す。図8には比較のため、PI層($2\mu\text{m}$)/DLC薄膜/Si基板上に接合したLEDの I_F - P_{LED} 特性も示した。図8に示したように、DLC薄膜/Si基板上に直接接合したLEDでは I_F の増加に伴うLEDの温度上昇が小さいため、 $I_F < 10\text{mA}$ 程度の I_F 範囲で、 I_F が大きくなっても I_F にほぼ比例して P_{LED} が増加する。一方、PI層($2\mu\text{m}$)/DLC薄膜/Si基板上に接合したLEDでは、 I_F の増加に伴うLEDの温度上昇が大きいため、 I_F が 3mA 程度で P_{LED} が飽和し、 $I_F > 3\text{mA}$ の I_F 領域で P_{LED} が急激に減少する。このように、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した高放熱LED構造によって、 I_F が大きな領域であってもLEDの発光効率が減少せず、大きなLED発光強度が得られることを検証した。図8で、DLC薄膜/Si基板上に直接接合した高放熱LED構造の場合の最大発光強度(I_F - P_{LED} 特性曲線のピーク値)

は、PI層 (2 μm) / DLC薄膜 / Si基板上に接合したLEDの場合の最大発光強度の約3倍である。このように、DLC薄膜 / Si基板上に直接接合した高放熱LED構造によって、LEDの大出力化を実現することができる。

ま と め

本技術開発では、Si基板上に形成したDLC薄膜上にLED薄膜を接着剤を使用せずに直接接合（分子間力接合）できることをはじめて実証した。さらに、DLC薄膜 / Si基板上にLED薄膜を接合した構造で、高い放熱性が得られ、大きなLED電流領域でもLEDの発光強度が減少せず、大きなLED発光強度が得られることを検証した。本稿では、LEDプリントヘッドで使うLED材料を取り上げ、高放熱構造LEDアレイを実現する新しい『ものづくり』技術について述べた。本技術は、LEDプリントヘッド用LEDアレイの他、高い放熱性が要求されるさまざまな素子に幅広く応用できる可能性を持っている。

謝 辞

本研究開発の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けて実施したものである。◆◆

参考文献

- 1) 荻原光彦：LEDプリントヘッドの最新動向，沖テクニカルレビュー，208号，Vol.73 No.4，pp.28-31，2006年
- 2) 荻原光彦：エピフィルムボンディングによる異種材料融合デバイス，OKIテクニカルレビュー211号，Vol.74 No.3，pp.98-103，2007年
- 3) M. Ogihara, T. Sagimori, M. Mutoh, H. Furuta, T. Suzuki, H. Fujiwara and M. Sakuta : Single-Crystal Thin-Film Bonding on Diamond-Like Carbon Film by Intermolecular Force for Super High-Density Integration of High-Power LEDs, "Abstracts of IEEE International Electron Device Meeting (IEDM) 2008, Dec. 15, 2008 - Dec. 17, 2008, San Francisco, CA, USA" , pp. 477-480, 2008

● 筆者紹介

鷲森友彦：Tomohiko Sagimori. 株式会社沖デジタルイメージング 開発部

武藤昌孝：Masataka Muto. 株式会社沖デジタルイメージング 開発部

藤原博之：Hiroyuki Fujiwara. 株式会社沖デジタルイメージング 開発部 チームリーダー

荻原光彦：Mitsuhiko Ogihara. 株式会社沖デジタルイメージング 開発部 部長