セラミック基板上に直接フリップチップ接合された 白色LED光源の信頼性評価法

藤井 智*, 福井 剛*, 内田 裕士**, 倉井 聡*, 田口 常正*

Evaluation on Reliability of White LED Light Source Directly Flip-Chip Bonded on Ceramic Substrates

Satoshi FUJII*, Takeshi FUKUI*, Yuji UCHIDA**, Satoshi KURAI* and Tsunemasa TAGUCHI*

*山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

**山口大学工学部 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

*Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University (2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611)

**Faculty of Engineering, Yamaguchi University (2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611)

Abstract

We have recently fabricated high-power near-ultraviolet light-emitting diodes (LED) on ceramic packages without sub-mounts, using a direct flip-chip bonding (DFCB) technique. In the ceramic packages, pad electrodes of 0.35 mm LED chips were bonded onto metalized packages using metal stud bumps. The cross-sectional microstructures of the chip/bump/ceramic of both non-degraded and degraded DFCB packages were investigated using a scanning electron microscope with energy dispersive x-ray spectroscopy. We have confirmed the presence of firm flip-chip interfaces between the stud bumps and the DFCB packages, and failure at the p-type contact layer/p-electrode interface. In addition, x-ray computed tomography (CT) and ultrasonic scanning were carried out as non-destructive inspection methods. The cracks at the interfaces of the DFCB package could be detected by ultrasonic scanning inspection, but not by x-ray CT, due to the lack of resolution.

Key Words: White LED, Flip-Chip Bonding, Assembly, Failure, Interface

1. 緒 言

1.1 LEDの高出力化と実装技術

LEDは高効率、長寿命、水銀フリー、デザイン性に優れているなどのメリットがあり、21世紀の光源としてたいへん注目されている。現在、LEDは高効率かつ小型であることが要求される小型ディスプレイや携帯のバックライトやイルミネーション用ライトの分野で多く用いられている。今後、LEDがより高光束かつ高効率になっていくにつれて、家庭やオフィス用の照明や大型ディスプレイのバックライト、車のヘッドランプなどへの普及が予想される。照明用途や大型ディスプレイなどにLEDを活用しようと考えた場合、現状の出力では十分とはいえない。そこで、LEDチップの大型化は、一般照明や大型ディスプレイ用光源として十分な光出力を得るための試みの1つとして試されている¹⁾。しかし、投入電流の増加に伴うInGaN活性層の特性からくる急速な発光効率の減少（ドループ現象）が確認されている²⁾。また、電流パスの集中によるチップの劣化が懸念され、チップの大型化には複雑な電極設計が必要となる。これに対して、フルカラーLEDディスプレイなどにも用いられている小型LEDチップの集積化は、上記の問

題などにおいて大きなアドバンテージを持っているといえる^{3),4)}。

高出力化のために、チップの大型化や小型LEDチップの集積化を行った場合、熱の発生は避けられず、結果として、十分な発光効率や寿命が確保できないといった問題が生じる。チップから発生する熱の改善を行うためには、チップの発光効率を上昇させて、熱の発生を減らすことも重要であるが、放熱性の優れた基板材料・構造の選定や実装技術もあわせて重要となってくる。そこで、われわれは、多数のLEDチップをセラミック基板上にサブマウントを使用しないでフリップチップ実装する(Direct Flip Chip Bonding:DFCB)方法を用いることで、実現不可能と考えられていた大規模集積LED(Large-Scale Integrated LED)光源の開発に成功した⁵⁾。これにより、照明用途などの高光束が要求される分野でも、LEDが有効に活用される段階に到達している。

1.2 LEDの普及と信頼性評価法

LEDの普及はさまざまな分野に広がっており、固体照明などの分野に関しても実用化に近づいている。LEDの高効率化や高光束化に対応したチップ効率の改善、実装技術や基板や蛍光体などの材料開発が進み、これらを利用した

Fig. 1 Schematic image of the bonding techniques of LEDs

LEDデバイスの構造も複雑化している。特に、化合物半導体を材料とするLEDは、Siなどを材料とする半導体部品に比べ、材料的に弱い、熱に弱い、欠陥が多いなどのため、デバイスの信頼性に不安が存在する。今後LEDデバイスが市場に登場し、必要とされるには「性能」だけでなく、「信頼性」を確保する必要がある。しかし、劣化メカニズムに関する系統的な研究事例は少なく、信頼性解析、故障モード解析に関する技術蓄積も非常に少ないのが現状である。

今後さらにLEDを普及させていく上で、デバイスまたはプロセスに潜在する故障モードにともなうリスクの確認と解析を行うことができる信頼性評価方法の確立が必要である。また、それに基づいた最適な設計やプロセス条件確立が必要となる。そこで、従来のシリコン系LSIデバイスにおいて構造解析手法として実績あるいくつかの評価方法を用いて、開発したマルチチップ集積型LEDの構造解析を行い、最適な信頼性評価法について検討した。

2. LEDの大規模集積実装技術とデバイス構造

DFCB法を用いてセラミック基板上に作製したLSILED光源に用いられている技術と構造について説明する。従来のLEDはFig. 1(a)のように電極が上を向いており、それを金線で接続（ワイヤボンディング）する、フェイスアップ実装と呼ばれる方式が用いられている。この場合、金線径が細く熱抵抗が大きいため、熱伝導率の低いサファイアを介して放熱を行うことになり、熱的に不利である。また、樹脂との応力で金線が破断する、照明として用いた場合に金線の影が生じるなどの問題がある。これに対して、Fig. 1(b)のように電極が下を向くフリップチップ実装がある。フリップチップ実装を用いることで、金線に比べ接合断面積を広く取ることができ熱を逃がしやすい、発光層からの光が外部に出る際に、サファイア面からの光を取り出せることで、電極での光の減衰を回避できる、光の取り出し面と空気との屈折率差が小さいため（sapphire：1.7，GaN：2.5，空気：1.0）、光の取り出し効率が向上するなどの長所がある⁶⁾。Fig. 1(b)のように金属ヒートスラグとの絶縁にSiやSiCなどのサブマウントを利用する方法がある。この場合、サブマウント材料の熱伝導率や光吸収特性による効率低下が懸念される。また、ワイヤボンディング工程が必要となり、コンタクト数が増大するため工程が複雑化し、工

Fig. 2 Schematic image of direct flip-chip bonded LED on ceramic package

程歩留まりが落ち、十分な信頼性を確保することが難しい。そこで、われわれはサブマウントを使用しないで、パターン配線された高熱伝導セラミック基板の上に直接フリップチップ実装を行った（Fig. 1(c)）。ワイヤを全く使用しないため、断線による故障のリスクがなく、かつ、ワイヤ用のパッドスペースを省くことができるために集積密度を上げることができ、構造の簡略化にもつながるため、実装の信頼性が向上する。さらに実装コストダウンの面からも有利である。また、高熱伝導性のセラミック基板に直接ボンディングすることで放熱性も改善される。DFCB法は大規模かつ高集積型LEDの実装に有利と考えられる。

Fig. 2にDFCB法を用いて作製したLEDパッケージの構造を示す。実験には0.35 mm角でピーク波長が405 nmの近紫外LEDを用いた。フリップチップ用近紫外LEDのp型コンタクト電極には光取り出し効率を向上させるため、反射率の高い電極材料が用いられており、その上に金パッド電極が形成されている。セラミック基板は放熱性に優れたAlNを用い、金スタッドバンプによりLEDチップを接合した。

3. SEM-EDXを用いたDFCB-LEDの断面構造解析

3.1 評価および評価サンプル作製方法

本実験ではLEDにおけるチップ／バンプ／セラミック界面の構造を調べ、LEDの故障原因を突き止めるため、長時間点灯した後に点灯および非点灯となったLEDチップの断面構造を観察し、白色LEDへ適用する場合の評価法としての有効性を検証、LED故障原因の究明と今後の問題点を明らかにした。評価法として、従来のシリコン系LSIデバ

Fig. 3 Cross-sectional SEM images of non-degraded LED with mechanical polishing method

Fig. 4 Cross-sectional SEM images of degraded LED with mechanical polishing method

イスにおいて構造解析手法として実績のある⁷⁾、Field-Emission型 (FE-) SEM-EDX (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) 装置 (JEOL SM-09010@15KeV) による断面構造解析と断面組成分析を行った。サンプルの断面の作製における研磨の方法は、サンプルを樹脂に埋め込み、機械的に切断し、研磨する機械研磨法と、試料に遮蔽板を密着させて遮蔽板から出ている部分をAr (アルゴン) イオンのスパッタエッチングで削る、クロスセクションポリッシュ法 (CP法)⁸⁾を用いた。

3.2 機械研磨法によるLED断面構造解析

点灯および非点灯LEDチップの高分解能SEMによる断面観察像をそれぞれFig. 3, Fig. 4に示した。点灯するチップについては、Fig. 3のように良好な連続界面が確認できた。これに対して、Fig. 4の非点灯チップについては、p型電極のAu-Padからの剥離が観測され、これが故障原因と考えられた。剥離箇所のギャップは数 μm と見積もられるが、研磨ダメージの影響でギャップ部が変成しており、詳細構造は解析できなかった。

3.3 イオン・エッチングによるSEM-EDXを用いたLED構造解析

研磨加工による試料の損傷を極力避けるため、半導体などの電子実装部品などの断面解析で実績を上げているCP法により試料の観察断面を形成し、その断面をFE-SEM-

Fig. 5 Cross-section of GaN/p-type electrode/bump interface of non-degraded LED

Fig. 6 Cross-section of GaN/p-type electrode/bump interface of degraded LED

EDXにて評価した。主要な加工条件は (イオン種: Ar+, 加速電圧: 4kV, ガス圧: 10^{-4}Pa) である。GaN/p型およびn型コンタクト電極/Auパッド電極/Auスタッドバンプ近傍を観察した。点灯LEDチップのSEM像をFig. 5に、非点灯LEDチップのSEM像をFig. 6に示す。また、素子を構成する各層の原子拡散層の有無を確認するためのEDXによる元素分布マッピングを行った結果をFig. 7に示す。

これらの観察より、p型電極については、GaN/p型コンタクト電極/Auパッド電極/Auスタッドバンプ、n型電極についてはGaN/n型コンタクト電極/Auパッド電極/Auスタッドバンプの層状構造になっており、DFCB構造が設計どおり正常に作製されていることがわかった。

非点灯LEDチップのp型部分にのみ、GaN層とp型コンタクト電極層の間に $0.1\mu\text{m}$ 程度の亀裂が発生しており、その他のGaN/n型コンタクト電極間、p型・n型コンタクト電極/Auパッド電極間、Auパッド電極/Auスタッドバンプ間、およびAuスタッドバンプ/セラミック基板上配線間にはそのような亀裂は見られず、それぞれが密着していることがわかった。また、すべての試料において、Auパッド電極とAuスタッドバンプの間にボイドが観測されたが、これは、通常のLSIにおけるフリップチップ接合でも見られるもので、通電上無害なレベルと考えられた。3.2で示した樹脂埋め込み+機械研磨法により作製した断面試

Fig. 7 Ga, p-type contact metal, and Au mapping by along the interface around p-electrode of degraded LED
((a) Ga mapping, (b) p-type contact metal mapping, (c) Au mapping)

料を用いた観察とは若干構造が異なって見えるが、これは機械研磨法では試料へのダメージにより亀裂が拡大し、亀裂に別の物質が充填されていたためと考えられる。CP法では断面作製のダメージが大幅に低減されたことにより、機械研磨では十分に観測できなかった微細な構造が観測され、亀裂の詳細構造も明らかにされた。LEDの故障の原因となる亀裂などはたいへん微小であるため、断面観察などで発見するためには、なるべくダメージの少ない研磨法を選択することが重要である。この観察結果は、不良がp型GaNコンタクト層とp型コンタクト電極間の接着力が低いことに起因していることを示唆しており、DFCB実装により形成されるAuパッド電極/Auスタッドバンプ間接合が不良の主たる要因でないことを初めて確認した。熱応力によりp型GaNコンタクト層/p型コンタクト電極間に亀裂が発生することが、この試料における非点灯の原因であったと考えられる。

4. 非破壊検査を用いた白色LEDの信頼性解析

4.1 非破壊による信頼性評価法

SEM-EDXを用いた断面観察を行うことで、非点灯の原因がp型GaNコンタクト層/p型コンタクト電極間の亀裂によることがわかった。次に、このような亀裂が生じた場合に、これを非破壊で評価する方法について検討した。LEDの信頼性を保証するために、非破壊試験によって、LED中のクラックやボイドなどを発見し、非点灯チップと点灯チップの判別を行うことは非常に重要である。非破壊検査には外部から放射線や超音波などの照射や、電流を流す方法など、何種類もの方法があるが⁹⁾、ここでは、従来

のシリコン系LSIデバイスにおいて構造解析手法として実績ある^{10),11)}、X線断層撮影 (Computed Tomography:CT) および高周波超音波探傷による非破壊構造解析方法をLEDに用いた場合の結果について述べる。

4.2 X線CTによる構造解析

SEM-EDX測定で用いたものと同一の試料について、 μ -focus X線CT(東芝ITコントロールシステム社, TOSCANER-32250 μ hd)を用いて構造解析を行った。測定条件はTable 1に示した通りである。

測定部位(亀裂Au電極近傍)のX線投影写真をFig. 8に示す。セラミック基板にパターンニングされたメタル配線とAuバンプの配列が確認できる。CT撮影範囲としては、CP加工断面から内側へ、Au電極の存在する部分に対し、30断面、約200 μ m範囲のCT画像を構成した。FE-SEM観察したCP加工断面近傍のCT画像の一例として、Fig. 8中に線で表示した位置におけるCT画像をFig. 9に示す。DFCBにより実装されたチップ配列やボンディング位置の確認には有効と考えられるが、Au層と考えられる部分のハレーションが大きく、FE-SEM観察によって確認されたGaN/p型コンタクト電極間の亀裂は観察できなかった。この原因として、本システムのX線源焦点寸法は4 μ mであり、 μ -focus X線CT画像の空間分解能としても数 μ mであることと、p型コンタクト電極/Au層のX線の線吸収係数が大きく、Au層内のX線の透過が十分ではないことによるAu層のハレーションにより、さらに分解能が悪化していることが考えられた¹²⁾。よって、 μ -focus X線CTによるDFCB LEDパッケージの不良解析は困難であると考えられる。

Table 1. Measurement condition of μ -focus X-ray CT

Focal Spot Size of X-ray	4 μ m
Tube voltage for X-ray photographing	150 kV
Tube current for X-ray photographing	35 μ A
The distance between a X-ray generator and a sample	11.7 mm
The rate of magnification	192
Scanning area	1.347 mm ϕ
One pixel size	1.3 μ m
slice thickness	6 μ m
The number of projections	3,600 (by 0.1 $^\circ$)
Measurement location	30 cross section from cross section to inside (about 200 μ m)

Fig. 8 X-ray project photography for plane view of the degraded LED **Fig. 9** X-ray cross-section view of the degraded DFCB package

4.3 高周波超音波による構造解析

高周波超音波による非破壊構造解析の有効性について検討した。超音波探傷は、他の検査方法と比較して亀裂や剥離の検出力が優れており、最近では電子部品の信頼性評価や故障解析に多用されている¹³⁾。検査原理をFig. 10により説明する。超音波探触子内の圧電素子が高電圧パルスの印加により振動し、この振動により発生した超音波は水中で試験体にあたると弾性波としてサンプル内部を伝播する。内部に欠陥やボイドなどの異物が存在すると音響インピーダンスの変化が起こるため、反射・屈折といった挙動を示す。例えば、図中のLEDパッケージのLEDチップとモールド樹脂界面などがこれに相当する。また、チップ中にクラックが存在する場合は、クラックによる反射が観測される。音響インピーダンス Z は式(1)のように試験体の密度 ρ と音速 C の積で表される。

$$Z = \rho \times C \quad (1)$$

反射率 R は接している2つの材質の音響インピーダンス Z_1 , Z_2 の組み合わせにより異なり、式(2)で求められる。

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

特に密度が桁違いに小さい空気の場合は反射率がほぼ100%となり、これが剥離や亀裂を精度良く検出する大きな要因となる。

FE-SEM (EDX) によってGaN/p型コンタクト電極間に約0.1 μ mの亀裂が確認されたLEDチップおよび亀裂がない正

Fig. 10 Schematic illustration of ultrasonography**Table 2.** Measurement condition of ultrasonography

Frequency	200 MHz
Visual field size	0.6×0.6 mm, 1.5×1.5 mm
Pitch	1 μ m, 2 μ m, 5 μ m
Gain	46, 50 dB

常なLEDチップについて高周波超音波探傷による評価を行い、測定結果を比較した。高周波超音波探傷は、日立建機社製のHSAM220を用い、Table 2に示す探傷条件下で試験を行った。

亀裂ありのサンプルおよび亀裂なしのサンプルについて、サンプル中央部におけるAスコープ像（超音波信号波形）とCスコープ像をそれぞれFig. 11, 12に示した。ここで、Fig. 11, 12の左に示すような信号波形をAスコープと呼び、

Fig. 11 Ultrasonic signal and image of the degraded DFCB package

Fig. 12 Ultrasonic signal and image of the non-degraded DFCB package

均質な材料内の音速は一定であることから、時間軸はそのまま探触子と試験片および欠陥界面の距離に対応する。所定の位置に相当する範囲にゲートを掛け、その範囲内の信号ピーク値を取り出せば、その深さにおける音響特性を示す情報が取り出せる。このセッティングで超音波探触子を平面内でスキャンし、各ポイントにおける信号レベルを輝度変調して面情報表示したものがCスコープ (Fig. 11, 12の右) である。サンプルのCスコープ像は探傷ピッチ1 μmにおける探傷画像であり、輝度が高いほど検出超音波信号強度が高いことを意味している。

Fig. 11とFig. 12のAスコープにおいて、白い点線で囲っている部分がLEDチップ近傍からの超音波の反射強度を示している。LEDチップを構成するサファイア基板 (Al_2O_3) の音速と厚みを10,000 m/sと約80 μmとすると、超音波伝播時間は16 nsとなるので、Aスコープにおいてチップの表面反射波と底面からの反射波を厳密に分離することはできない。しかしながら、亀裂がある場合とない場合ではLEDチップからの反射強度変化の形状に特徴的な違いがある。LEDチップからの反射強度波形の左側がチップ表面からの反射 (空気/チップ) を示し、右側がチップの底の部分から反射を示しており、これは両者の試料で観測されている

が、正常なサンプルでは波形の中央部分では大きな反射が観測されていない。これに対して、亀裂ありの場合は、LEDチップからの反射波形の中央部分にも反射が見られる。このことより、亀裂ありチップはLEDチップ近傍に不連続な部分が存在することを観測できた。LEDチップ部分のCスコープを見たとき、亀裂がない場合は、LEDチップ内の超音波の反射強度が比較的均一であるのに対し、亀裂がある場合は、空隙の存在により音響インピーダンスが大きく変化し、反射強度が大きく複雑に反射していることが見て取れる。非点灯の故障チップにおいては、p側電極に相当する像の右側で空隙による反射信号が大きいいため、輝度が高く (白く) なっており、SEMによる破壊検査の結果とも一致している。

5. 結 論

DFCB法を用いてセラミック基板上に作製した高集積型LEDの信頼性評価を行った。CP法によって断面研磨し、SEM-EDXを用いて非点灯チップからp型Ga_{0.5}In_{0.5}Nコンタクト層とp型コンタクト電極/Au層の間に0.1 μm程度の亀裂が観測された。

次に、非破壊検査方法として、X線CT法および高周波

超音波探傷法を用い、断面観察した同評価サンプルを評価した。X線を用いることで、実装されているパンプの状況を見ることができるため、打ち漏れや位置ずれを発見することができるという十分な有用性を持っていたが、LEDの剥離検出法としては、われわれの開発したDFCB実装を用いたLEDでは、十分な分解能を得ることができないため、チップの故障原因である亀裂を発見することは難しいという結果が得られた。一方、超音波探傷は、剥離検出感度が非常に高く、高速でのチップ全面探傷も可能であることから、非破壊でのチップ選別法として極めて有効であると言える。

LEDの信頼性はSiなどの半導体デバイスに比べまだまだ低いいため、今後、非破壊試験の評価方法として紹介した超音波探傷などを用いて、実装条件のさらなる最適化と故障のリスクをさらに減少させる構造を設計していく必要があると思われる。

謝辞

本研究は、文部科学省知的クラスター創成事業の援助により行われた。

(2008.9.11-受理)

文 献

- 1) 渡辺 智：“GaInN系LEDの発光特性と高出力素子”，電子情報通信学会技術研究報告．ED，電子デバイス，Vol. **102**，No. 116，pp. 37–40，2002
- 2) M. F. Schubert, S. Chhajed, J. K. Kim, E. F. Schubert, D. D. Koleske, M. H. Crawford, S. R. Lee, A. J. Fischer, G. Thaler and M. A. Banas: “Effect of Dislocation Density on Efficiency Droop in GaInN/GaN Light-Emitting Diodes”, Applied Physics letters, 91, 231114, 2007
- 3) T. Taguchi: “Developing White LED Lighting Systems and Its Technological Roadmap in Japan”, J. Light & Vis. Env., Vol. **30**, No. 3, pp. 177–182, 2006
- 4) M. Kanamori: “High-Power White LEDs Based on a Multiple Small Chip Structure”, Proc. of First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07), pp. 26–30, 2007
- 5) T. Miyachi, H. Sakuta, K. Kamon, H. Hayashi, T. Fukui, N. Nakamura, Y. Uchida, S. Kurai and T. Taguchi: “Development of Light Sources by the Large-Scale Integrated Light-Emitting Diodes”, J. Light & Vis. Env., Vol. **32**, No. 2, pp. 238–240, 2008
- 6) J. J. Wierer, D. A. Steigerwald, M. R. Krames, J. J. O’Shea, M. J. Ludowise, G. Christenson, Y.-C. Shen, C. Lowery, P. S. Martin, S. Subramanya, W. Götz, N. F. Gardner, R. S. Kern and S. A. Stockman: “High-Power AlGaInN Flip-Chip Light-Emitting Diodes”, Applied Physics letters, Vol. **78**, 3379, 2001
- 7) 大和田伸郎：“超LSIの不良解析”，精密工学会誌，Vol. **58**，No. 2, pp. 230–233, 1992
- 8) 長澤忠広：“電子顕微鏡・表面分析のためのブロードなアルゴンイオンビームを用いた試料前処理法”，ふんせき（日本分析化学会誌），No. 388, pp. 185–189, 2007
- 9) 野坂康雄：“非破壊検査について”，鉄と鋼：日本鉄鋼協会々誌，Vol. **45**，No. 10, pp. 1169–1180, 1959
- 10) 横野泰和：“非破壊検査の種類と特徴”，溶接学会誌，Vol. **59**，No. 6, pp. 410–413, 1990
- 11) 高堂 積，有田宏志，大野恭秀：“マイクロフォーカスX線CT技術と半導体検査への応用（光部品の実装，信頼性）”，電子情報通信学会技術研究報告．OPE，光エレクトロニクス，Vol. **103**，No. 35, pp. 55–58, 2003
- 12) 富澤雅美，谷脇吉典，御子柴茂生，長谷川 伸：“先験的知識の利用によるX線CT画像の画質改善”，電子情報通信学会論文誌，D-II，情報・システム，II-情報処理，Vol. **J81-D-2**，No. 2, pp. 437–445, 1998
- 13) 神田 浩，石川 潔，片倉景義，加藤重雄，平松敬之：“高い深度分離機能を有する超音波顕微鏡の開発”，精密機械，Vol. **51**，No. 4, pp. 750–755, 1985