U. D. C. 621.382.23：535.376〕：546.681' 19' 18
62-192

$GaAs_{1-x}P_x$ 発光素子の信頼度

Reliability of $GaAs_{1-x}P_x$ Light Emitting Diodes

小久俊彦* 富永武*
Toshihiko Kohisa Takeshi Tominaga

要旨

最近表示装置に対する小形化と低電圧動作および高信頼性の必要性から発光素子への要求が高まり，製造技術の進展と相まって急速に普及しようとしている。ここでは発光ダイオードの信頼性について，各種検討した結果について報告する。透明レジンモールドに対する耐湿性の懸念，および温度サイクルによる断線の心配などはいずれもきびしい環境試験，寿命試験の結果問題ないことを確認した。また順方向動作時の輝度の経時変化についても電流密度との対応を加速寿命試験により明らかにし，10～15 mA 程度の電流値に対する平均寿命を推定し，実用上高信頼性のレベルにあることを述べる。

1. 緒言

電子機器の発達と普及に伴い，より見やすいディスプレイとして，さまざまな方式のものが生み出されたが，信頼性の面からみると必ずしも満足すべきものではなかったように思える。たとえば豆ランプを発光源にしたディジタル表示器は一つくらいは常に切れており，二つ目が切れて役に立たなくなった例はよく経験したことである。これは豆ランプの信頼度が非常に低いためで，実際的なデータとして，電子卓上計算機の市場における故障率によれば，8,300 Fit[1] とヒューズに次いで2番目に高いと報告されている。またニクシー表示管の故障率は 470 Fit[1] とあり，これはわれわれが確認した MOSLSI の信頼度よりも悪いレベルである。一方機器の小形化と回路の簡単さは表示器全体の小形化と低電圧化(共通電源の使用)を要求しており，ニクシー管のように高電圧電源と高耐圧回路を必要とするものは固体表示装置に順次置き換っていくものと考えられる。しかるに固体表示装置としての発光素子の信頼度であるが，発光ダイオード，数字表示素子とも市場に出ての日は浅く，いまだ実績評価をされるには至っていない。一方，信頼度データについては総括的な結果は公表されていないようであるが，高電流密度の順方向動作を行なうと発光出力が減少するということは以前から指摘されているし，GaAs トンネルダイオードのピーク電流値が下がることに対する不良機構の検討もされている[2][3]。この発光出力減少のメカニズムについては (i) Zn イオンが順方向バイアス時に電界により移動してしまうため[4]，(ii) Frenkel 欠陥の形成による[2]などがあるが，いまだ定説はない。最近では GaP の発光出力が Cu イオンによって著しく劣化するということが報告されている[5]。また V_F-I_F 特性から発光出力が減少したものは発光に寄与する $\exp(eV/kt)$ に比例する拡散電流成分が減って，$\exp(eV/2kt)$ に比例する接合の空乏層内の再結合電流成分の割合が増加していることもわかっている。

しかしいずれも不良機構解析を目的とした高電流密度の場合のみを扱ったものであり，実際的な電流値での変動については述べられていない。Ⅲ-Ⅴ 化合物は安定した材料であり，PN 接合の順方向動作は半導体使用条件では正常な条件であることなどからすれば従来の半導体製品の信頼度水準に達することはじゅうぶん期待してよいだろう。

本稿では日立製作所で開発した $GaAs_{1-x}P_x$ の全レジン形発光ダイオード HE1102 に関し，各種信頼度試験を通して得られたデータをもとに発光素子の信頼性について述べることにする。

* 日立製作所半導体事業部

2. 信頼性からみた注目点

Si プレーナトランジスタやダイオードは逆耐圧特性を利用する関係上，表面酸化膜内の Na^+ などの正イオンにより P 層表面が N 反転してできるチャンネルリークが信頼性を左右する大きな要因であるのに対し，発光ダイオードは順方向動作が基本であるため低インピーダンス回路となり，この種の問題は起こりにくい。また発光ダイオード特有の発光現象も表面下3～5 μ の PN 接合面の近傍で起きているため表面汚染といった単純な要因に対しても余り影響を受けないことも期待できよう。一方，パッケージ材料の面からみた場合，発光素子用のモールドレジンは透明度を保持するために，熱膨張係数を下げるような充てん物を混入させることができない。その結果高温高湿試験や煮沸試験において，リードフレームとレジンの界面を通して水分の浸入や，温度サイクルによるコネクタ断線不良はトランジスタや IC の場合よりも不利といえる。

しかしながら，電極が Au の蒸着によりできていることおよびボンディングコネクタも Au 線であるため，たとえ水分が浸入しても電極の腐食による断線は起こりにくいと考えられる。この点 Al 蒸着で電極パッドを形成しているトランジスタや IC より強いといえよう。

問題は上記のように外的要因によるものよりも連続通電によって輝度がどの程度変動するかである。すなわち PN 接合の発光機構は空乏層近くの P 層内において正孔と N 層から拡散してきた電子との直接遷移による発光再結合を起こすことであるが，Longini は GaAs 素子が順方向動作で劣化する理由として順方向バイアス下においてアクセプタとなる Zn イオンが接合を通って拡散してしまうためであると説明している[4]。したがってわれわれはこの点に注目しながら信頼度試験を行なった。その他の留意点としては外形が小さいためのリード張り強度がじゅうぶんあるかどうかである。これは内部コネクタの断線につながるので注意しなければならないことである。

3. 各種信頼度試験と検討

3.1 信頼度試験項目と故障判定基準

発光ダイオードの特徴の一つに上げられる高信頼性も，詳細にみると前述したように未確認の要因を含んでいること，さらに発光現象という従来の半導体素子にはない機構を伴っているために，一応一般的な試験も行なって比較するようにした。また順方向通電試験については劣化モードをみるために最大定格の許容損失の 1.6 倍，2.2 倍に当たる 150 mW，200 mW を付け加え，耐湿性試験には通常の高温高湿試験のほかに 120℃ 2 気圧の水蒸気圧下に放置するプレ

表1　故障判定基準

測定項目	測定条件	規格	寿命終止点 上限	寿命終止点 下限	単位
リーク電気 (I_R)	$V_R=-3$ V	<7.0	$U\times2.0$		μA
耐圧 (BV_R)	$I_R=10$ μA	≧4.5		$L\times0.8$	V
順方向電圧 (V_F)	$I_F=25$ mA	≦2.0	$U\times1.2$		V
輝度 (B)	$I_F=10$ mA	≧170		$L\times0.7$	FL

U：規格最大値
L：規格最小値

最大定格

項目 / 記号 / 単位 / 形名	消費電力 P_C mW	電流 I_F mA	逆耐圧 V_R V	動作温度 T_{op} ℃	保存温度 T_{stg} ℃
HE1102	90	50	4	−20～75	−30～90

ッシャークックテストを入れた。モールドレジンの熱膨張係数大によるコネクタの断線不良のチェックには温度サイクルテストでみることにした。

次に故障判定基準についてであるが，これは本来，用途，目的によって変わるものであるが，従来基準に合わせたものは表1に示すとおりである。ここで輝度の変化率について規定していないのはランプやニクシー管の代りという点からすれば最小輝度を押えればよいという考え方に基づいている。しかし変化率は故障モードを把握(はあく)する上で重要なパラメータになるので，故障率の算出とは別に検討する。

3.2 動作寿命試験

HE 1102 の最大許容損失は 90 mW であるので，これを中心にして 150 mW, 200 mW の順方向動作試験を行なった。通電動作中のところを示したのが図1である。これらの条件を電流密度でいえばそれぞれ $J=57.8$ A/cm², 89 A/cm², 117 A/cm² になる。表2はその結果を示したものであるが，$P_d=90$ mW では試料数 147 本を試験にかけ総試験時間 226,500〔CH〕で耐圧劣化不良1本と，最悪使用条件で MTBF $=10^5$〔HR〕以上に達する良好な結果を得た。また $P_d=150$ mW でも 54,000〔CH〕で不良なく，$P_d=200$ mW においては 37,500〔CH〕で輝度低下不良が1本発生しただけというじゅうぶん余裕のあることを確認することができた。

次に順方向通電による輝度の劣化程度であるが，図2は $P_d=90$ mW における相対輝度の 5,000 時間にわたる経時変化を示したものである。また個々の製品の状況は $P_d=150$ mW の場合の例として図3に示されている。各条件に対する相対輝度の変化を平均値で表わしたのが図4である。これから GaAs 発光ダイオードに関して報告されている輝度の劣化は $GaAs_{1-x}P_x$ である HE1102 についても当てはまることがわかる。

しかしながら C. Lanza[6] などは時間に対して指数関数的に輝度が劣化することを指摘しているのに対し，われわれのデータでは電流密度が 117A/cm² と大きい場合でも劣化傾向が時間的にゆるやかになっている。それゆえ HE1102 の平均寿命を外そう法で求めることは少し無理があるが適用してみる。図4において，1,000 時間までの輝度劣化が

$$B=B_0\exp(-t/\tau) \quad \cdots\cdots(1)$$

B_0：初期輝度
B：時間 t における輝度
t：時間
τ：低減時定数

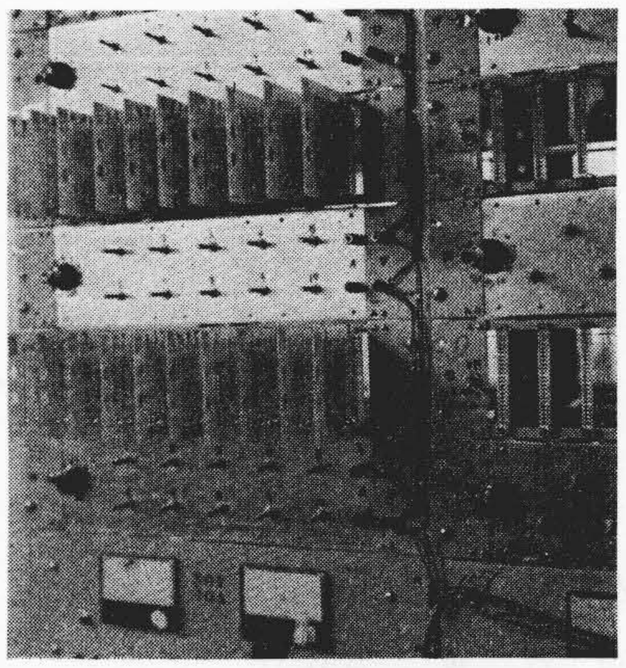

図1　動作寿命試験中の発光素子

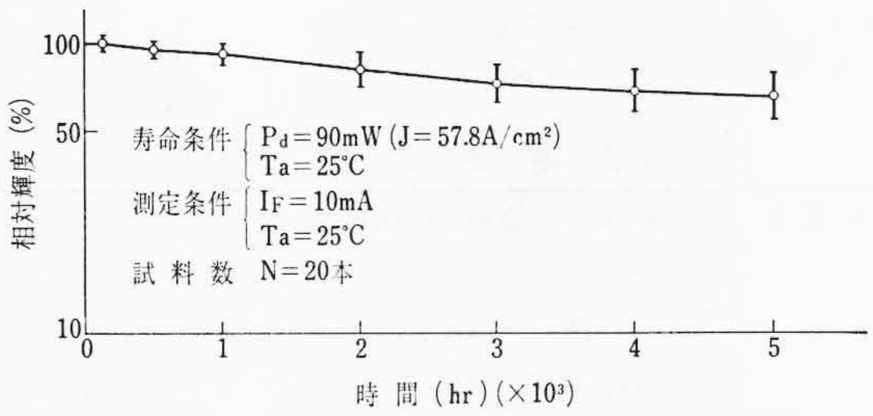

図2　動作寿命における輝度の経時変化

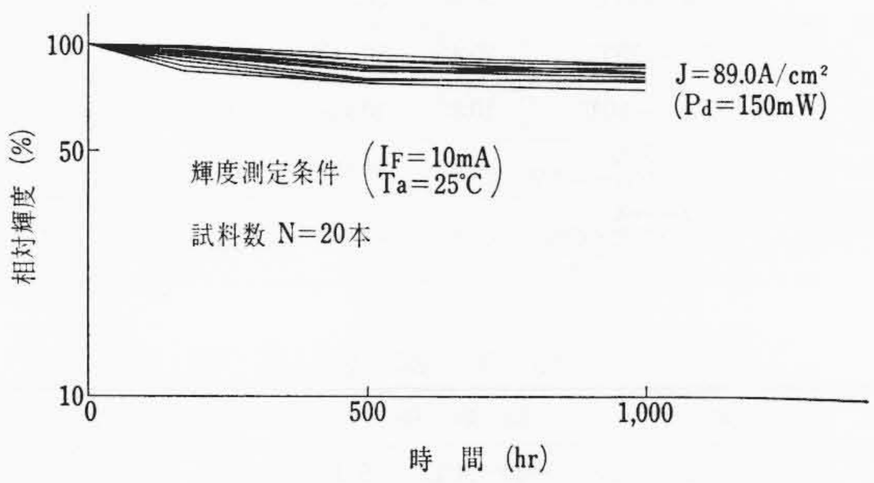

図3　動作寿命における輝度の経時変化

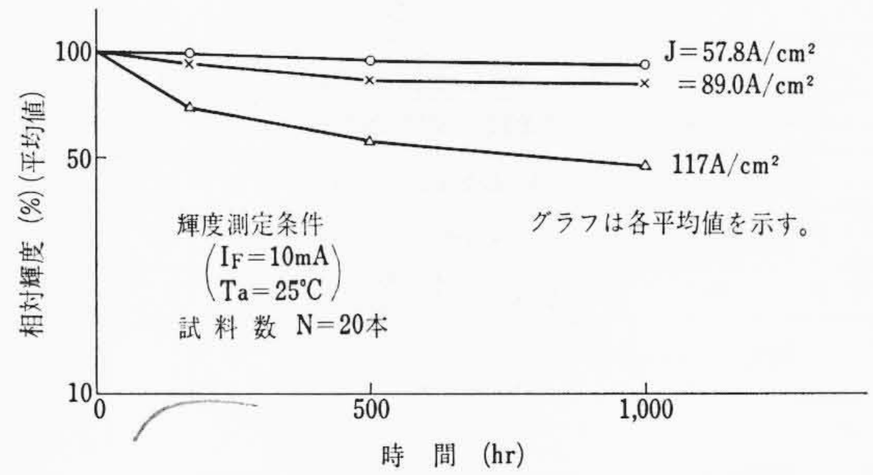

図4　動作寿命における輝度の経時変化

に従っていると仮定して時定数 τ を求め，次ぎに $B/B_0=50\%$ になる時間 t_h を算出する。この t_h と接合温度 T_j，活性化エネルギー E_a の間にアレニウスの式

$$t_h=A\cdot\exp\cdot\left(\frac{E_a}{kT_j}\right) \quad \cdots\cdots(2)$$

が成り立つと仮定し，各 T_j と t_h をプロットすると図5が得られる。

これから $T_a=25$℃ 付近で $I_F=10$ mA 程度の動作では MTBF で数万時間は期待できる。また実際は劣化に飽和性があることを考え

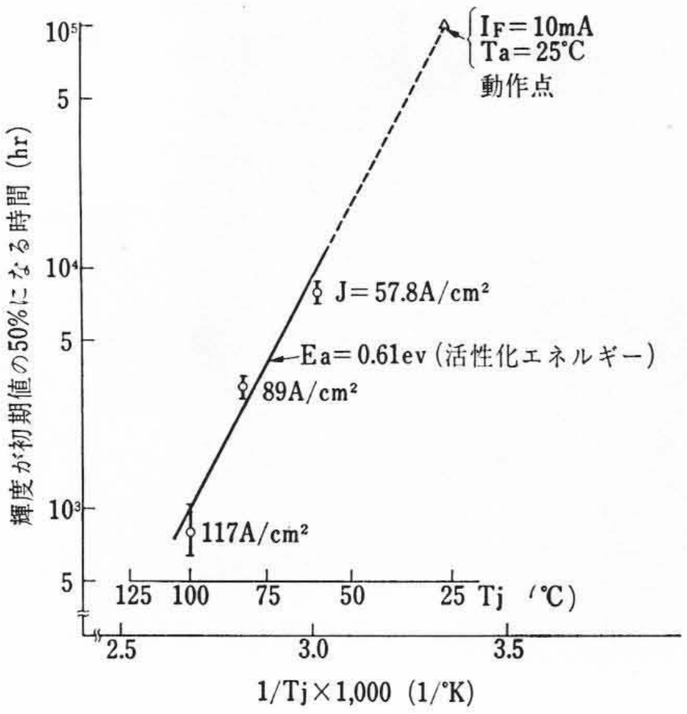

図5　動作寿命時の接合温度と輝度が50%になるまでの時間

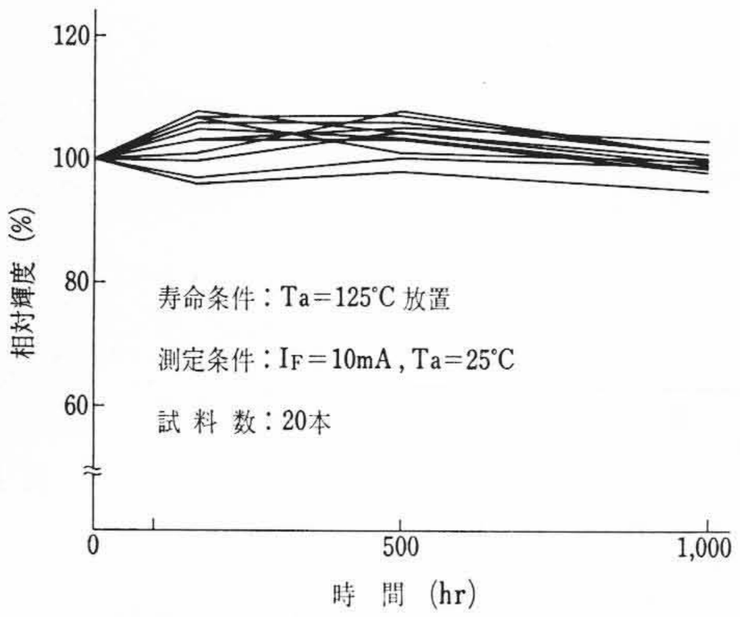

図6　高温放置における輝度の経時変化

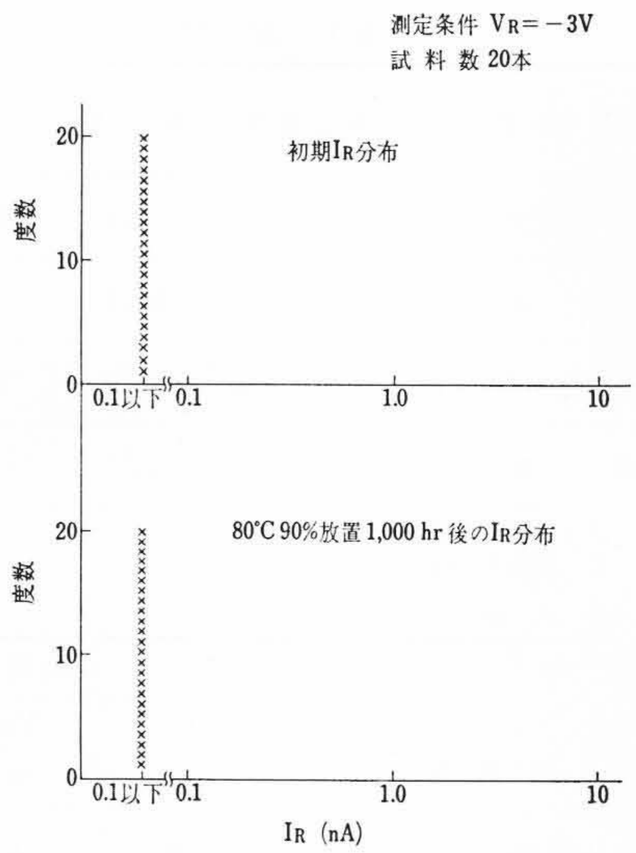

図7　80℃ 90% 放置試験における I_R の変動

表2　寿　命　試　験　結　果

試験項目	試験条件	試料数	総試験時間数	不良数	不良内訳	故障率（90%水準）
動作寿命	Pd=90 mW	147本	C.H 226,500	1本	V_R劣化 ×1	1.72×10^{-5} (1/h_r)
	Pd=150 mW	54本	54,000	0本		4.3×10^{-5}
	Pd=200 mW	38本	37,500	1本	輝度低下 ×1	1.04×10^{-4}
高温高湿放置	Ta=40℃ $RH\geq95\%$	61本	61,000	0本		3.77×10^{-5}
	Ta=80℃ $RH\geq90\%$	40本	40,000	0本		5.75×10^{-5}
高温放置	Ta=100℃	56本	56,000	0本		4.11×10^{-5}
	Ta=125℃	20本	20,000	0本		1.15×10^{-4}
低温放置	Ta=−30℃	10本	10,000	0本		2.3×10^{-4}
高温逆バイアス	Ta=75℃ V_R=−3V	44本	44,000	0本		5.22×10^{-5}
高温高湿逆バイアス	Ta=40℃ $RH\geq95\%$ V_R=3V	44本	44,000	0本		5.22×10^{-5}

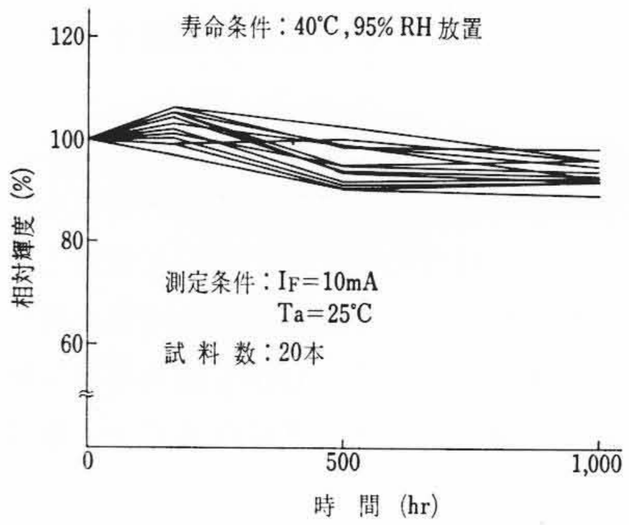

図8　高温高湿による輝度の経時変化

表3　環　境　試　験　結　果

試験項目	試験条件	試料数	不良数	不良内訳	備考
温度サイクル*1	−30～90℃ 5 Hz	511	0		
	−30～100℃ 50 Hz	83	0		参考試験
	−55～125℃ 50 Hz	71	0		参考試験
煮沸	100℃ 20 Hrs	31	0		2 hrs まで規定試験
熱衝撃	0℃（1分）～100℃（1分） 50 Hz	94	0		5 Hz まで規定試験
プレッシャークック・テスト	120℃ 2気圧 20 Hrs	44	0		参考試験
MIL 耐湿	MIL-STD-102B	70	0		
リード引張試験	1.4 kg 10 sec	36	0		
耐半田熱	260℃ 10 sec 根本から3 mm	15	0		

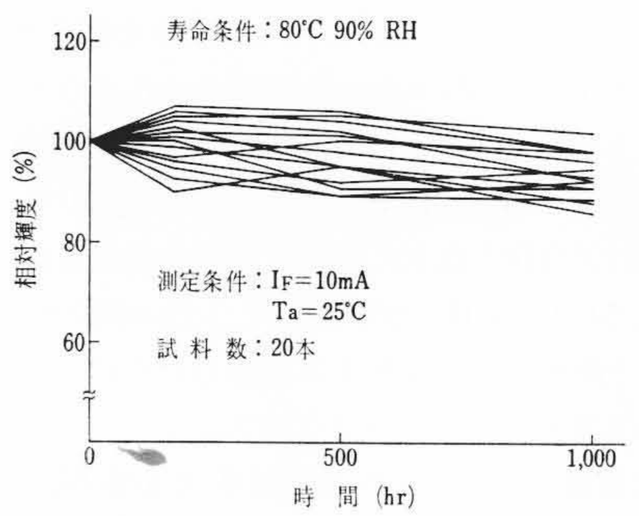

図9　高温高湿による輝度の経時変化

れればさらに長くなると考えられる。また活性化エネルギー E_a はグラフのこう配から求めると 0.61 eV になるがこの値は A. Berth[5] が GaP 発光ダイオードの輝度劣化解析レポートの中で，順方向通電による内部劣化は活性化エネルギー 0.5～0.8 eV で起こるという報告値内にはいっている。もち論これだけで輝度の劣化は内部であるということにはならない。

なお半導体としての耐圧 BV_R（I_R=10 μA）は OP=90 mW, 150 mW, 200 mW のいずれに対しても経時変化はみられず，リーク電流 I_R（V_R=3 V）も同様にすべて 0.1 nA 以下と，これを越えて劣化するものはなく，きわめて安定した信頼性を有していることを確認した。

3.3　高温放置試験

高温エージングによる影響をみるために 100℃ と 125℃ の放置試験を行なったが結果は**表 2** に示したように不良の発生はなく，輝度の経時変化も**図 6** に示したように小さく，平均値では測定誤差を考えれば，ほとんど影響を受けていないといえる。I_R, BV_R にも変化はない。

3.4　耐湿性試験

透明レジンは半導体用パッケージとしての実績はなく，熱膨張係数も従来レジンに比べて 3～4 倍もあることからリードフレームとの界面を通しての水分の浸入に注目しながら耐湿評価を行なう必要

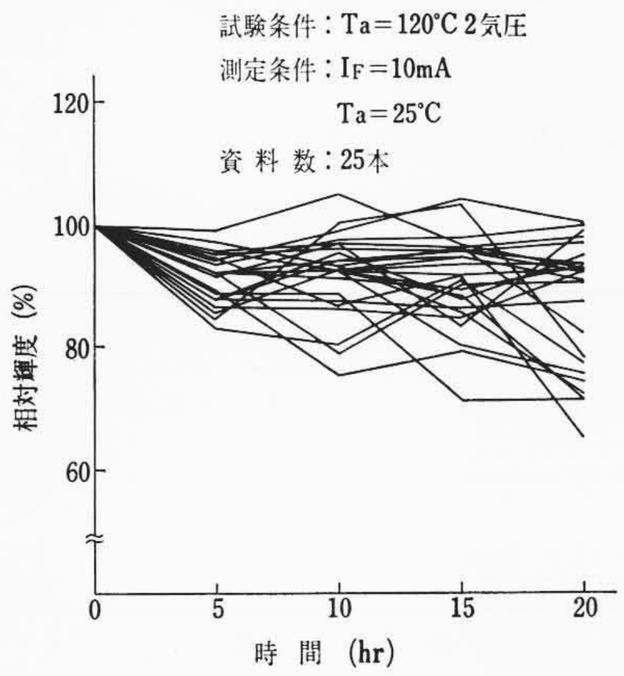

図 10　プレッシャークックテストにおける輝度の経時変化

がある。そのため試験条件には規定の40℃ 95% RH, 煮沸試験, MIL 耐湿試験(MIL-STP-102B)のほかに加速試験として80℃ 90% RH, プレッシャークックテスト (120℃ 2 気圧の水蒸気中に放置) を付け加えた。120℃ はレジンの保証温度の 90℃ を越えるため, 問題点検討の面で心配されたが, あえて行なった。 総合結果は**表 2**, **表 3** に示すとおりであるが従来のモールド形トランジスタ, IC に比べて同等以上の良好な水準にあることを確認した。特に逆方向リーク電流 I_R をみると, 40℃ 95%, 80℃ 90%, 1,000 HR 後でも増大はみられず初期値の 0.1 nA 以下にとどまったままである(**図 7**)。同様に逆耐圧 V_R の波形にも変化はなかった。また最もきびしいプレッシャークックテストでも, 5 時間までは I_R, V_R とも変化せず, 10 時間目から I_R が増大を始めた。 これを 15 時間, 20 時間と続行したが, I_R の増大はみられるものの, 故障判定基準の 7 μA を越えるものはなかった。V_R にも変化はなかった。次に輝度の劣化の点であるが, 40℃ 95%, 80℃ 90%, プレッシャークックテストの結果を示すと, それぞれ**図 8, 9, 10** である。

経時変化の程度は動作寿命試験に比べて小さく, 1,000 時間後で, 40℃ 95% は平均 5%, 80℃ 90% の場合は 7% 程度の減少にすぎなかった。 またプレッシャークックテストでも 5 時間では平均 8.2% くらい下るだけで, その後継続してもばらつきは増すが平均値でみると大して劣化は進んでいない。

このように耐湿性の点で良好な結果を得たことは

(i)　HE1102 はパッケージ構造がオールレジン形で, 金属との界面部が直接外部に出ているのはリード線だけであるために熱膨張係数の影響を最小限にし得たことと,

(ii)　素子がプレーナ構造で表面酸化膜が耐湿に役立っている。

などのためであると考えられる。また輝度の劣化が小さいのは発光部が PN 接合近傍の P 層内にあるためで, 表面汚染の影響を受けにくいからであろう。耐湿性にすぐれていることは発光素子が環境条件に強い製品として今後発展する大きな要素を有しているものとも思われる。

3.5　逆バイアス試験

表面酸化膜と $GaAs_{1-x}P_x$ の界面の安定性をみるために周囲温度 75℃ で逆バイアス電圧 3 V を印加した高温逆バイアス試験および 40℃ 95% のふん囲気中で逆バイアス電圧 3 V を印加した高温高湿逆バイアス試験 1,000 時間を行なったが, 結果は**表 2** に示したように良好であり, 電気的特性, 輝度の経時変化にも問題はなかった。これより逆耐圧を生かした応用面に対してもじゅうぶん安心して使用できるものと考える。

3.6　環　境　試　験

温度サイクル試験を始めとする一般環境試験を行なった。特にレジンの熱膨脹係数が大きいために起こる熱ストレスによるコネクタ断線不良に注目して温度サイクルと熱衝撃試験を 50 サイクルまで行なったが, 結果は**表 3** に示したように断線不良はなく, 輝度の劣化もなかった。 断線不良については最大定格を越えた −55℃～+125℃ 50 サイクルの温度サイクルでも発生しなかったので, まずじゅうぶんなマージンがあると考えられる。これは耐湿性の試験で良好であったように, パッケージ構造がオールレジン形であるためであると思われる。

4.　結　　言

発光ダイオードの信頼性を種々の環境条件下で試験を行ない検討してきたが, 予期されたとおり高信頼性を有していることが判明した。順方向動作による輝度の経時変化の問題は電流密度に大きく依存しており, 電流密度を小さくしてやれば心配はない。たとえば 10～15 mA の電流値では MTBF で数万時間は期待できると考えられ, 劣化の飽和性を考慮するなら, さらに長くなるはずである。また耐湿性を含めた環境試験に非常に強く, かつレジンモールド封止であるから, 振動衝撃にも問題はなく, 今後かなり広範囲にわたる応用分野で使用可能であると考えられる。

参　考　文　献

(1)　佐々木:　エレクトロニクスダイジェスト　10 月 (1969)
(2)　R. D. Gold and L. R. Weisberg:　Solid-State Electron　7, 811 (1964)
(3)　S. A. Steiner and R. L. Anderson:　Solid-State Electron　11, 65 (1968)
(4)　R. L. Logini:　Solid-State-Electron　5, 127 (1962)
(5)　A. A. Bergh:　IEEE Transc.　ED-18, No. 3, 116 (Mar., 1971)
(6)　C. Lanza, K. L. Konnerth and C. E. Kelly:　Solid-State Electron　10, 21 (1967)