

AlGaInP 发光二极管老化性能研究

郑元宇

三安光电科技有限公司, 福建 厦门 361009

摘要 采用金属有机化学气相沉积系统外延 AlGaInP 发光二极管, 制备成面积小于 $12\text{ mil} \times 12\text{ mil}$ ($300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ mil} = 25.4\text{ }\mu\text{m}$) 的芯片, 封装成裸晶结构并在 50 mA 、 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 加速应力环境下进行 1008 h 老化寿命实验, 研究外延结构中不同掺杂浓度的分布式布拉格反射镜 (DBR) 及分段掺杂 P 型层对小尺寸芯片老化性能的影响。结果表明: 随着芯片尺寸缩小, 光衰幅度变大, 当芯片尺寸小于 $9\text{ mil} \times 9\text{ mil}$ ($225\text{ }\mu\text{m} \times 225\text{ }\mu\text{m}$) 时, 通过提升 DBR 的掺杂浓度可以明显降低光衰幅度; 降低与过渡层相邻的 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 薄层的掺杂浓度, 形成分段掺杂 P 型层, 通过降低第二段 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 薄层的掺杂浓度, 可以进一步提升老化性能。尺寸为 $6\text{ mil} \times 6\text{ mil}$ ($150\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$) 的芯片在 50 mA 、 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下老化 1008 h , 其光衰幅度可控制在 -6% 以内。

关键词 光学器件; AlGaInP; 小尺寸; 分布式布拉格反射镜掺杂; 分段掺杂 P 型层; 光衰

中图分类号 TN315 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.052302

Study on Aging Properties of AlGaInP Light Emitting Diode

Zheng Yuanyu

San'an Optoelectronics Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361009, China

Abstract A chip with an area of less than $12\text{ mil} \times 12\text{ mil}$ ($300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ mil} = 25.4\text{ }\mu\text{m}$) is fabricated using a metal organic chemical vapor deposition system epitaxial AlGaInP light emitting diode. The chip is packaged in a bare crystal structure and accelerated at 50 mA , $50\text{ }^\circ\text{C}$ condition for 1008 h aging experiment. The purpose of the experiment is to investigate the effects of distributed Bragg reflectors (DBR) and segmented doped P-type layers on the aging properties of small-sized chips with different doping concentrations in epitaxial structures. Results show that as the chip size shrinks, the light attenuation becomes larger. Increasing DBR doping concentration can significantly reduce the light attenuation when the chip size is less than $9\text{ mil} \times 9\text{ mil}$ ($225\text{ }\mu\text{m} \times 225\text{ }\mu\text{m}$). In addition, segmented doped P-cladding are prepared by reducing the doping concentration between the P-Al_{0.5}In_{0.5}P layer and transition layer, and reducing the second P-Al_{0.5}In_{0.5}P doping concentration can further enhance the aging properties. The light attenuation can be controlled within -6% for the aging experiment under the 50 mA constant current at $50\text{ }^\circ\text{C}$ to 1008 h with chip size of $6\text{ mil} \times 6\text{ mil}$ ($150\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$).

Key words optical devices; AlGaInP; small size; distributed Bragg reflector doping; segmented doped P-cladding; light degradation

OCIS codes 230.3670; 160.6000; 330.1720

1 引言

四元合金材料 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (AlGaInP) 具有较宽的直接带隙, 覆盖了 $560\sim 650\text{ nm}$ 的可见光波长, 以 AlGaInP 材料作为有源区的发光二极管 (LED) 具有较高的内量子效率, 且与 GaAs 衬底晶格完全匹配, 是制备红光 LED 的优选材料^[1-2]。作为新型光源, AlGaInP LED 具有节能、环保等显著优点, 在显示系统、照明系统、汽车系统等领域得到广泛应用^[3-4]。除了发光效率外, LED 的可靠性成为研究的重点。目前评估 LED 可靠性的主要方法为加速应力 (电流和温度) 实验, 通过加快 LED 内部物理化学变化, 缩短实验时

收稿日期: 2016-11-23; 收到修改稿日期: 2017-01-18

基金项目: 国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项 (2016FYB0400600)

作者简介: 郑元宇 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事 AlGaInP 系 LED 方面的研究。E-mail: yzhenxmu@126.com

间,根据相应的理论模型推算出实际工作时的理论寿命^[5]。国内报道的LED失效机理主要包括封装材料退化、P型掺杂不稳定、深能级与非辐射复合中心增加、静电失效、P型欧姆接触退化等^[6-13]。尽管许多文献报道LED的理论寿命可达 10^5 h以上,但在实际应用中,LED随着芯片尺寸的不同表现出不同的结果。目前,关于AlGaInP系列LED可靠性的研究,大部分是针对尺寸超过 $12\text{ mil}\times 12\text{ mil}$ ($300\text{ }\mu\text{m}\times 300\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ mil}=25.4\text{ }\mu\text{m}$)以上的芯粒^[7-13],而针对尺寸较小的芯片的老化性能研究工作开展较少。为此,本文以芯片面积小于 $12\text{ mil}\times 12\text{ mil}$ 的AlGaInP红光LED为研究对象,将其制备成不同的小尺寸芯片,从外延角度出发,首先研究不同浓度的分布式布拉格反射镜(DBR)掺杂对不同尺寸芯片老化性能和光电性能的影响;然后,研究了分段P型层对小尺寸芯片的老化性能和光电性能的影响。本文旨在探讨在芯片尺寸缩小情况下与外延本身有关的失效模式和机理,为高可靠性器件的设计提供参考。

2 实 验

本研究制备AlGaInP红光LED所采用的设备是金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统,以高纯氢气(H_2)作为载气,分别以三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAl)、三甲基铟(TMIn)、砷烷(AsH_3)、磷烷(PH_3)作为Ga、Al、In、As、P源,用乙硅烷(Si_2H_6)、二茂镁(Cp_2Mg)分别作为N、P型掺杂剂。LED外延结构示意图如图1(a)所示,具体方法描述如下:在N型(100)偏(111) 15° 的GaAs衬底上,首先通入 AsH_3 ,温度渐变7 min上升至 $700\text{ }^\circ\text{C}$,并在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 稳定2 min,反应室压力设定为60 Torr($1\text{ Torr}=133.322\text{ Pa}$),对GaAs表面进行脱氧;然后在GaAs衬底上生长AlAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 材料的DBR层,通入 Si_2H_6 作为掺杂剂;接着在DBR层上生长N型层,材料选取 $\text{N-Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$,通入 Si_2H_6 作为掺杂剂;在N型层上生长有源层,材料选取 $(\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1})_{y_1}\text{In}_{1-y_1}\text{P}/(\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2})_{y_2}\text{In}_{1-y_2}\text{P}$ 多量子阱(MQW);在有源层上生长P型层,材料选取 $\text{P-Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$,通入 Cp_2Mg 作为掺杂剂,流量设定不变,持续通入14 min,生长厚度为 $0.36\text{ }\mu\text{m}$,掺杂浓度为 $1.0\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$;在P型层上生长过渡层,过渡层采用 $\text{P-Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{P}$ 组分渐变材料,最后在过渡层上生长电流扩展层GaP,通入 Cp_2Mg 作为掺杂剂,掺杂浓度为 $0.7\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 。

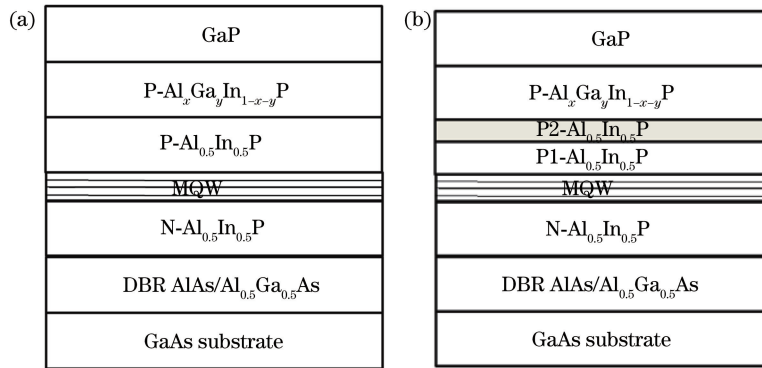


图1 (a) AlGaInP LED外延结构示意图;(b)分段掺杂P型层AlGaInP LED外延结构示意图

Fig. 1 (a) Epitaxial structure sketch map of AlGaInP LED; (b) epitaxial structure sketch map of segmented doping P-cladding AlGaInP LED

为了研究DBR掺杂对不同尺寸芯片老化性能影响,本研究选择4种DBR掺杂分子浓度,分别为 3.60×10^{18} , 4.68×10^{18} , 5.76×10^{18} , $7.20\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$,并制作成三组不同尺寸的芯片,第一组分子尺寸为 $12\text{ mil}\times 12\text{ mil}$ ($300\text{ }\mu\text{m}\times 300\text{ }\mu\text{m}$),第二组尺寸为 $9\text{ mil}\times 9\text{ mil}$ ($225\text{ }\mu\text{m}\times 225\text{ }\mu\text{m}$),第三组尺寸为 $6\text{ mil}\times 6\text{ mil}$ ($150\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}$)。制备出的样品封装成裸晶结构(COB),并在 50 mA 、 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 的加速应力环境下进行1008 h的老化寿命实验,老化过程中采用 20 mA 电流进行测试。采用SPC-4000 LED光电参数测试仪(IS光电参数测试仪)对LED器件的光电参数进行测量。

本研究还制备了不同分段掺杂P型层结构的LED,其结构示意图如图1(b)所示。以掺杂分子浓度为 $5.76\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 的DBR外延、尺寸为 $150\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}$ 的芯片为基础,制备了不同分段掺杂浓度的 $\text{P-Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 。具体外延过程如下:在有源层MQW上生长 $\text{P-Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$,先通入 Cp_2Mg ,保持流量设定不变,持续

通入10 min,设定生长厚度约 $0.26 \mu\text{m}$,掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,生长出第一段 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 层(图中用 P1-Al_{0.5}In_{0.5}P 表示);接着在 1 min 时间内将 Cp₂Mg 流量缓变降低 20%,40%,60%,再稳定生长 3 min,生长出第二段 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 层(图中用 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 表示),生长厚度约 $0.1 \mu\text{m}$ 。按照第二段 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 层不同掺杂浓度(分别约为 0.8×10^{18} , 0.6×10^{18} , $0.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)制备三种样品,封装成 COB,并在 50 mA、50 °C 加速应力环境下进行 1008 h 老化寿命实验。

3 结果与分析

3.1 AlGaInP LED 外延层结构及晶体质量

图 2 是 AlGaInP LED 外延层截面透射电子显微镜(TEM)图。从图中可以清晰地看出器件各层结构及厚度,层与层之间的界面清晰,说明外延的晶格质量较好。因 GaAs 和 GaP 之间晶格失配度高达 3.6%,因此从 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 到 GaP 采用 Al_xGa_yIn_{1-x-y}P 组分渐变材料作为缓冲层,图中可以清晰地看出该层将位错线抑制在界面处,为生长出晶格质量较好的 GaP 电流扩展层奠定了基础。

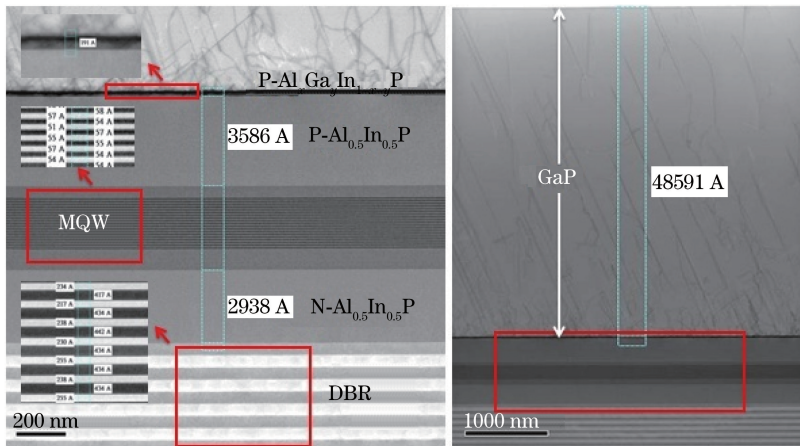


图 2 AlGaInP LED 截面 TEM 图

Fig. 2 Cross-sectional TEM image of AlGaInP LED

3.2 不同浓度 DBR 掺杂对不同尺寸芯片老化性能和光电性能的影响

表 1 是不同尺寸和 DBR 掺杂浓度的芯片的样品编号。将样品芯片封装成 COB,并在 50 °C、50 mA 的加速应力环境下进行 1008 h 老化寿命实验。图 3 给出三组不同尺寸样品的相对光输出随老化时间的衰减曲线(各条件取 10 颗芯片,以平均数据为考量依据,采用初始值进行归一化处理),测试电流为 20 mA。由图 3(a)可以发现,芯片尺寸较大时,在 1008 h 的老化过程中光衰幅度相对较小,1008 h 后光衰在 -5% 以内,且光衰随 DBR 掺杂浓度的不同变化较小。由图 3(b)可以发现,随着芯片尺寸缩小,在 1008 h 的老化过程中光衰幅度变大,1008 h 后光衰超过 -5%,在老化 1008 h 后测得样品 2-1 的光衰幅度为 -8.98%;但随着 DBR 掺杂浓度的增加,老化光衰幅度变小,在老化 1008 h 后测得样品 2-4 的光衰幅度为 -4.12%,相较样品 2-1 明显得到改善。由图 3(c)可以看出,在 1008 h 的老化过程中样品的光衰幅度变化更大,在老化 1008 h 后测得样品 3-1 的光衰幅度为 -15.46%;但随着 DBR 掺杂浓度的提升,老化也得到明显改善,老化 1008 h 后样品 3-4 的光衰幅度可缩小至 -5.96%。

表 1 芯片尺寸及 DBR 掺杂浓度

Table 1 Chip size and DBR doping concentration

No.	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4
Chip size / (mil × mil)	12 × 12	12 × 12	12 × 12	12 × 12	9 × 9	9 × 9	9 × 9	9 × 9	6 × 6	6 × 6	6 × 6	6 × 6
DBR doping concentration / (10^{18} cm^{-3})	3.60	4.68	5.76	7.20	3.60	4.68	5.76	7.20	3.60	4.68	5.76	7.20

在相同外延条件、相同加速应力环境下,芯片尺寸越小,光衰幅度越大,这主要是因为相同的电流下,芯片尺寸越小,面积越小,电流密度越大,DBR 等电流扩展效果越差,小尺寸的芯片在较大电流密度下经过长时间老化,有源区热量升高更快,结温更高,各层界面上形成的诸如位错等结构缺陷在较高温度下会快速

增殖、繁衍,侵入有源区,形成大量的非辐射复合中心,影响发光效率,使光衰幅度变大^[7]。在小尺寸情况下,通过提升 DBR 掺杂浓度,样品的老化性能可以得到明显改善,这可能是由于提升 DBR 掺杂浓度起到了更好的电流扩展效果,减少了芯片产生的热量,使得有源区非辐射复合降低,因此光衰幅度变小。相关的理论机理还需要进一步研究。

虽然提升 DBR 掺杂浓度有利于小尺寸芯片的老化性能,但 DBR 掺杂浓度并非越高越好。针对第三组 4 个样品(尺寸为 6 mil×6 mil),在室温、测试电流为 20 mA 条件下测试了 LED 的光效和电压与 DBR 掺杂浓度的关系,结果如图 4 所示。由图 4 可以发现,随着 DBR 掺杂浓度的递增,LED 光效呈递减趋势,电压呈递增趋势,光电性能变差。这主要是因为较高的 DBR 掺杂浓度同时会引入较多杂质,引起 DBR 晶体质量变差,电阻增加,电压增大,光效变低^[10]。因此,在实际应用中,需根据具体的要求选取 DBR 掺杂浓度。

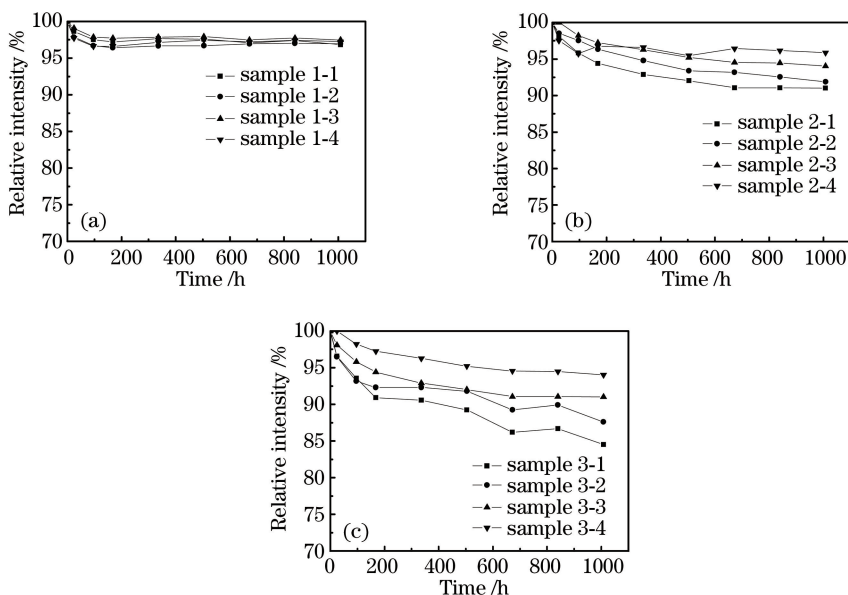


图 3 不同尺寸不同 DBR 掺杂浓度的芯片的相对光输出随老化时间的变化。

(a) 12 mil×12 mil; (b) 9 mil×9 mil; (c) 6 mil×6 mil

Fig. 3 Relative light output of the chips with different sizes and DBR doping concentrations versus aging time. (a) 12 mil×12 mil; (b) 9 mil×9 mil; (c) 6 mil×6 mil

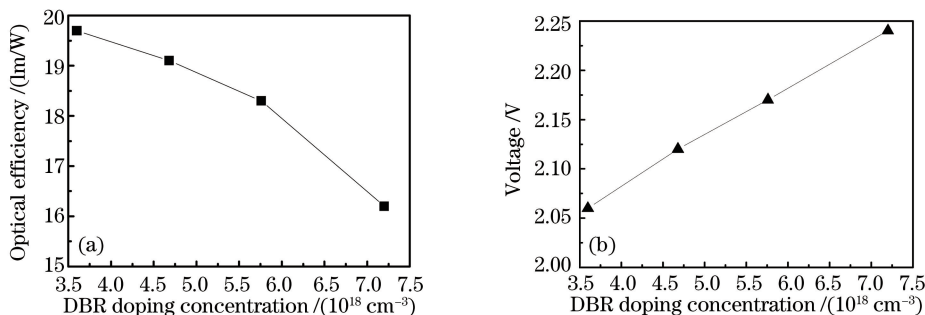


图 4 尺寸为 6 mil×6 mil 的芯片的 (a) 光效和 (b) 电压随 DBR 掺杂浓度的变化

Fig. 4 (a) Optical efficiency and (b) voltage of the chips with the size of 6 mil×6 mil versus DBR doping concentration

3.3 分段 P 型层对小尺寸芯片的老化性能影响

以掺杂浓度为 $5.76 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 DBR 外延、尺寸为 6.0 mil×6.0 mil 的芯片(样品 3-3)为基础,然后令 P1-Al_{0.5}In_{0.5}P、P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层的掺杂浓度不同,得到三种样品,各个样品 P 型层的掺杂浓度如表 2 所示。将这 4 种样品封装成 COB,并在 50 °C、50 mA 的加速应力环境下进行 1008 h 老化寿命实验,图 5 给出了各样品的相对光输出随老化时间的衰减曲线(各条件取 10 颗芯片,以平均数据为考量依据,采用初始值进行归一化处理),测试电流为 20 mA。从图 5 中看出,通过降低与过渡层相邻的 P-Al_{0.5}In_{0.5}P 薄层的掺杂浓度,形

成分段掺杂 P 型层,可以极大地提升老化性能。在 1008 h 的老化过程中,随着 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层的 Mg 掺杂浓度降低,光衰幅度变小,老化性能得到进一步提升。目前,在 LED 的老化光衰机理报道^[7-10]中,大都认为光衰是由于各外延层之间存在着或多或少的晶格失配,从而在界面上形成大量的诸如位错等结构缺陷,在较高温度时,这些缺陷会快速增殖、繁衍,直至侵入发光区,形成大量的非辐射复合中心,严重降低器件的注入效率与发光效率,进而引起老化光衰。文献[8]描述了过高的 P 型掺杂对老化的影响,在 LED 结构中,过渡层掺杂浓度最高,是影响老化的关键层,通常通过降低过渡层的 Mg 掺杂浓度来改善老化,但降低 Mg 掺杂很容易引起电压上升,影响光电参数。因此,本研究通过降低与过渡层相邻的 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 薄层的掺杂浓度,与过渡层形成浓度差,从而平衡过渡层掺杂,避免过渡层高掺杂在长时间老化中引入的非辐射复合增加导致的光衰^[8-10],同时通过保持与 MQW 相邻的 P1-Al_{0.5}In_{0.5}P 层的掺杂浓度,以保证 LED 电压,从而极大提升 LED 的可靠性和光电性能。

表 2 分段掺杂样品的 P 型层掺杂浓度

Table 2 P-cladding doping concentration of the segmented doping samples

No.	3-3	4	5	6
P1/P2 doping concentration / (10 ¹⁸ cm ⁻³)	1.0/1.0	1.0/0.8	1.0/0.6	1.0/0.4

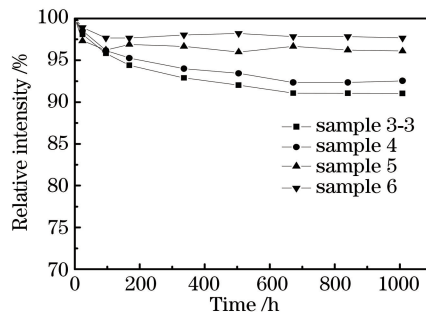
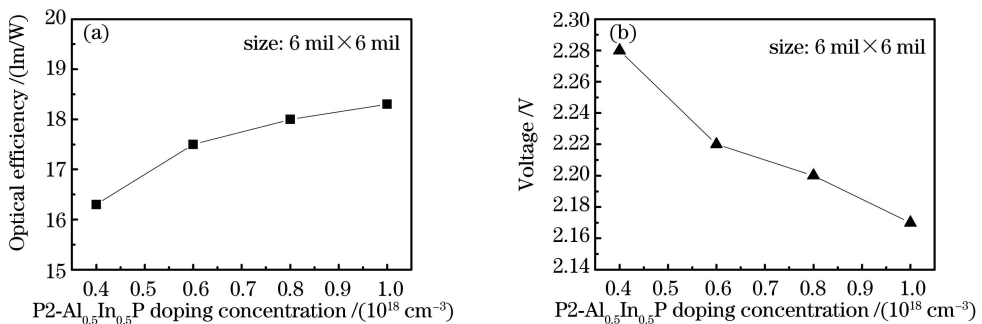


图 5 不同 P 型层掺杂浓度的芯片的相对光输出随老化时间的变化

Fig. 5 Relative light output of the chips with different P-cladding doping concentrations versus aging time

P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层的 Mg 掺杂浓度并非越低越好。针对这 4 个样品,在室温、测试电流为 20 mA 条件下测试了不同 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层掺杂浓度的 LED 的光效和电压,如图 6 所示。可以发现,随着 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层掺杂浓度递减,LED 的电压呈递增趋势,光效呈递减趋势。这主要是因为随着 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层掺杂浓度的降低,该层的串联电阻变大,导致整个 LED 的电压上升,光效变低。因此,在实际应用中,需根据具体的要求选取 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层的掺杂浓度。

图 6 不同 P 型层掺杂浓度的芯片的(a)光效和(b)电压随 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层掺杂浓度的变化Fig. 6 (a) Optical efficiency and (b) voltage of the chips with different P-cladding doping concentrations versus P2-Al_{0.5}In_{0.5}P doping concentration

4 结 论

采用 MOCVD 系统外延出高质量 AlGaInP 红光 LED。制备出面积小于 $12\text{ mil}\times 12\text{ mil}$ 的不同尺寸芯片,封装成 COB 并在 50 mA 、 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 的加速应力环境下进行 1008 h 老化寿命实验。研究发现随着芯片尺寸缩小,老化光衰幅度变大,当芯片尺寸小于 $9\text{ mil}\times 9\text{ mil}$ 时,通过提升 DBR 的掺杂浓度可以明显提升老化性能;但过高的 DBR 掺杂浓度会引起 LED 光效变低,电压变高。另外,降低与过渡层相邻的 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 薄层的掺杂浓度,形成分段掺杂 P 型层,通过降低 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 薄层的掺杂浓度,可以进一步提升老化性能;但 P2-Al_{0.5}In_{0.5}P 层掺杂浓度过低会引起电压变高,光效变低。本研究从外延的角度出发,通过结构优化,极大地提升了小尺寸芯片的可靠性,为高可靠性器件的设计提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Chen Yixin, Shen Guangdi, Meng Lili, *et al.* Improved extraction efficiency of AlGaInP light emitting diodes by nano-scale surface roughness[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22 (10): 1452-1454.
陈依新, 沈光地, 孟丽丽, 等. AlGaInP 系 LED 的表面纳米级粗化以及光提取效率提高[J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22 (10): 1452-1454.
- [2] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Shang Jun, *et al.* A dimming method for RGB LED based on three channels'PWM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001.
宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0223001.
- [3] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Chen Congying. Research on color mixing based on RGBW-LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0923004.
宋鹏程, 文尚胜, 陈聪颖. 基于 RGBW 四色 LED 的混光研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0923004.
- [4] Tsao J Y. Solid-state lighting lamps, chips and materials for tomorrow[J]. *IEEE Circuits & Devices Magazine*, 2004, 20(3): 28-37.
- [5] Zhao Aling, Shang Shoujin, Chen Jianxin. Life test and failure mechanism analysis for high-power white LED [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2010, 21(1): 48-52.
- [6] Meneghesso G, Meneghini M, Zanoni E. Recent results on the degradation of white LEDs for lighting[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2010, 43(35): 354007.
- [7] Pursiainen O, Linder N, Jaeger A, *et al.* Identification of aging mechanisms in the optical and electrical characteristics of light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(18): 2895-2897.
- [8] Altieri-Weimar P, Jaeger A, Lutz T, *et al.* Influence of doping on the reliability of AlGaInP LEDs [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 19(1): 338-341.
- [9] Liu Y J, Yen C H, Yu C H, *et al.* Characteristics of an AlGaInP-based light emitting diode with an indium-tin-oxide (ITO) direct ohmic contact structure[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(2): 246-252.
- [10] Gao Wei. Study of substrate transfer and reliability of AlGaInP LED[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
高伟. AlGaInP 转移衬底和可靠性的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [11] Wang Haiyan, Zhang Yating, Jin Lufan, *et al.* Acceleration aging study of amplified spontaneous emission broadband source[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0405003.
王海燕, 张雅婷, 金露凡, 等. 放大自发辐射光噪声的加速老化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0405003.
- [12] Wu Yuxiang, Shang Jun, Wang Xiaohong, *et al.* A light emitting diode driver based on pulse width modulation and pulse amplitude modulation dimming[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0922003.
吴玉香, 尚俊, 王孝洪, 等. 一种基于脉冲宽度调制和脉冲幅度调制的发光二极管驱动器[J]. *光学学报*, 2015, 35 (9): 0922003.
- [13] Hsu S C, Wu D S, Zheng X, *et al.* High-performance AlGaInP/GaAs light-emitting diodes with a carbon-doped GaP/indium-tin oxide contact layer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(9): 7023-7025.