

AlN 膜及其在半导体光电器件中的应用

郭良 朱素珍 张霞 余金中

(中国科学院半导体研究所,北京)

王德煌

(北京大学物理系)

1989年5月14日收到,1990年3月30日修改定稿

本文报道溅射 AlN 膜及其应用于半导体光电器件的实验研究结果。测定了不同条件下溅射的 AlN 膜厚度、淀积速率、折射率和击穿电场强度。首次用 AlN 膜做器件的端面保护和减反射膜以及表面钝化膜均获得成功。几种常用介质膜的实验数据对比分析表明 AlN 膜在半导体光电器件领域将有广阔应用前景。

主题词 氮化铝,半导体光电器件

一、引言

半导体发光二极管(LED)和激光器(LD)的端面制作和保护对器件的性能改善是极为重要的。在其端面镀介质膜可改善端面反射率同时防止镜面损坏,从而增加光输出功率并降低LD的阈值电流^[1]。另一方面用介质膜做半导体光电器件表面钝化膜,可以提高器件限制漏电流能力,获得良好性能的激光输出。因而近年来常用 Al₂O₃、SiO₂ 和 Si₃N₄ 等介质膜做半导体光电器件的端面保护和减反射膜以及表面钝化膜^[2-5]。本文用射频反应方法制备了性能良好的 AlN 膜。用它做半导体光电器件的端面保护和减反射膜以及钝化膜获得成功。比较几种常用的介质膜可以看出 AlN 膜在半导体光电器件中的广阔应用前景。

二、实验

在极限真空度 $(6-9) \times 10^{-4}$ Pa 的真空系统内用频率 13.56 兆周的射频反应溅射方法淀积 AlN 膜。射频放电电压范围 2000—2500 伏。溅射过程中通以含 2% 氩的高纯氮气,其压强范围 1—2 Pa。溅射靶是 99.999% 纯度、直径 100 毫米和厚 3 毫米的铝板。Si 或 GaAs 单晶衬底作为陪片和样品同时置入真空室内,为了清洁靶表面和减少真空室内含氧量,一般先预溅射几分钟。溅射过程中固定氮气压强和放电电压,只改变淀积时间制备不同厚度的 AlN 膜。用 α -台阶绘图仪测定陪片上 AlN 膜厚度。用激光椭偏仪 ($\lambda = 633\text{nm}$) 测量折射率。用菲涅耳公式计算和实验测量镀 AlN 膜的陪片表面反

射率 ($\lambda = 633\text{nm}$)。近红外区透射光谱用单色仪和 S_1 型光电倍增管以及锁相放大器等仪器的组合装置测量。用电流-电压法测量 AlN 的击穿电场强度。光电器件镀 AlN 膜前、后的性能用常规方法测定。

三、结果和讨论

溅射 AlN 膜的厚度与氮气压强、放电电压和淀积时间有关。固定其它条件,只改变淀积时间,淀积 AlN 膜厚度随时间线性增加而溅射速率基本不变。如图 1 所示,从直线斜率可求得溅射速率分别为 $3.8\text{nm}/\text{min}$ 和 $5.4\text{nm}/\text{min}$ 。可见控制氮气压强、放电电压和淀积时间可得到所需厚度的 AlN 膜。

图 2 表示 GaAs 表面淀积不同厚度 AlN 膜后,表面反射率 $R(\lambda = 633\text{nm})$ 的测量结果;标记 \triangle 是实验测量值 ($\lambda = 633\text{nm}$);——为菲涅耳公式计算的理论曲线 ($\lambda = 633\text{nm}$);----为菲涅耳公式计算的理论曲线 ($\lambda = 850\text{nm}$)。由图看出实验结果 ($\lambda = 633\text{nm}$) 与用菲涅耳公式计算的理论曲线 ($\lambda = 633\text{nm}$) 基本一致。为了比较,图 2 还给出了 $\lambda = 850\text{nm}$ 时的理论曲线。可见不同波长对 R 达到极小值所需 d 不同。但只要镀有介质膜, R 总是减小的,故叫减反射介质膜。图 3 表示 GaAs 表面淀积 122nm AlN 膜前、后的近红外透射光谱,由于 AlN 膜减小了表面反射率,相对透射光强明显增加。

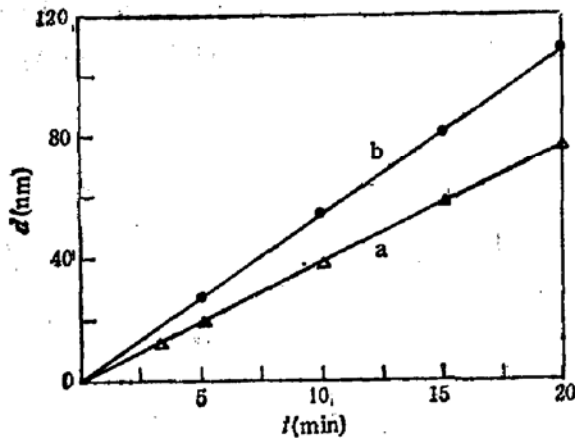


图 1 AlN 膜厚度 d 与淀积时间 t 的关系。

(a) 氮气压强 4Pa 、放电电压 2000V 。

(b) 氮气压强 2Pa 、放电电压 2500V 。

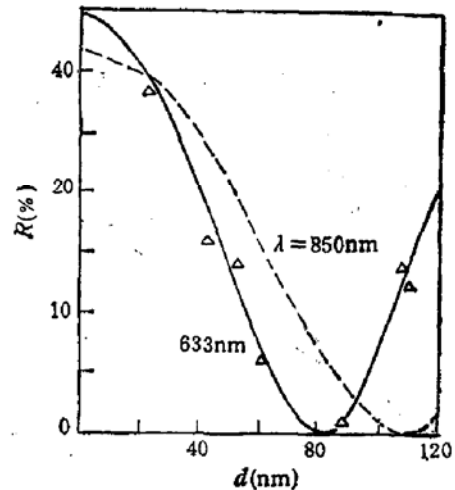


图 2 溅射 AlN 膜的 GaAs 表面反射率 R 与膜厚 d 的关系。

表 1 给出了不同的氮气压强 P 和放电电压 V 下淀积 AlN 膜的折射率 $n(\lambda = 633\text{nm})$ 和击穿电压强度 E_0 的实验数据。可以看出 AlN 膜的 n 值基本上与淀积时的 P 和 V 值无关,其值约为 1.97 , 比文献[6]所给数据(2.15)小,这可能是由于 AlN 膜内含有少量氧原子所引起的^[7]。不同溅射条件下淀积的 AlN 膜的 E_0 值略有差异,但均大于 1×10^6 伏/cm,表明 AlN 膜是绝缘性能良好的一种理想介质膜。

表 1 不同溅射条件下沉积 AlN 膜的折射率 $n(\lambda = 633\text{nm})$ 和击穿电场强度 E_0 的实验结果

$P(\text{Pa})$	2	2	4	4
$V(\times 10^3 \text{ 伏})$	2.0	2.5	2.0	2.5
$n(\lambda = 633\text{nm})$	1.96	1.98	1.97	1.98
$E_0(\times 10^6 \text{ 伏/cm})$	5.5	3.6	9.1	3.7

在实验研究溅射 AlN 膜性质的基础上,首次用它做半导体光电器件端面保护和减反

射膜。图 4(a) 和 (b) 分别表示 GaAs/GaAlAs 双异质 LED 和大光腔 (LOC) LED 正向端面沉积一层 AlN 膜前、后的光输出功率-电流曲线。从图可见,沉积 AlN 膜后不同类型 LED 的光输出功率均明显增加。图 5 表示 GaAs/GaAlAs 双异质结 LD 正反两端面沉积 AlN 膜和 Si 膜前、后的光输出功率-电流曲线。该 LD 正向端面沉积一层 75nm AlN 膜,背向端面沉积一层 88.8nm AlN 膜后再沉积一层 60nm Si 膜。根据介质膜理论^[8],它们在背向端面构成了低高折射率 ($n_{\text{AlN}} > n_{\text{Si}}$) 双层膜系,其 R 值增大。从图看出,LD 的阈值电流约从 54mA 下降

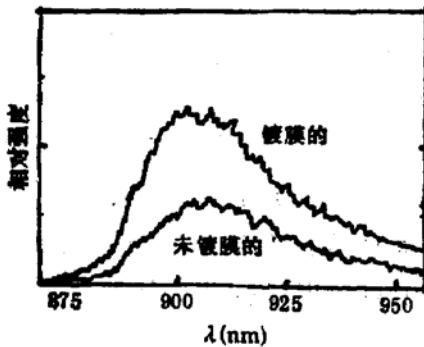


图 3 GaAs 表面沉积 AlN 膜前、后的近红外透射光谱

到 44mA, 而且输出同样功率所需工作电流也减小。上述实验结果表明 AlN 膜做半导体光电器件端面保护和减反射膜是完全成功的。

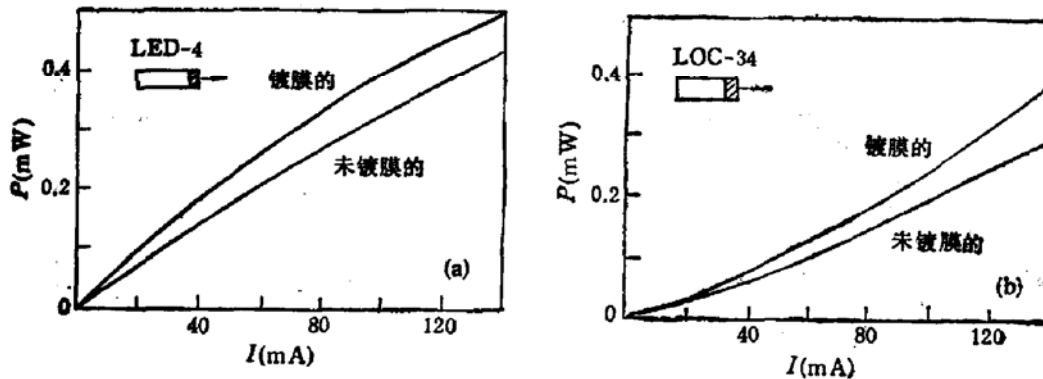


图 4 输出光功率与电流的关系曲线。
(a) 沉积 100nm AlN 膜的双异质结 LED; (b) 沉积 115nm AlN 膜的 LOC LED

到 44mA, 而且输出同样功率所需工作电流也减小。上述实验结果表明 AlN 膜做半导体光电器件端面保护和减反射膜是完全成功的。

我们还用溅射 AlN 膜做器件表面钝化膜,成功地制作了具有双沟脊形波导结构 (DCRS) 的 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 双异质结 LD, 实现了室温连续激光。图 6 表示该类型 LD 结构剖面图。如图 6 所示,在 (011) n -型 InP 衬底上液相外延生长四层双异质结构的基片,沿 $\langle 011 \rangle$ 方向刻蚀出台宽约 $7\mu\text{m}$ 、高约 $2\mu\text{m}$ 的双沟,形成脊形波导结构,溅射一层 80—100 nm AlN 膜,再在台面上化学刻蚀出约 $3\mu\text{m}$ 宽的窗口,最后制作金属

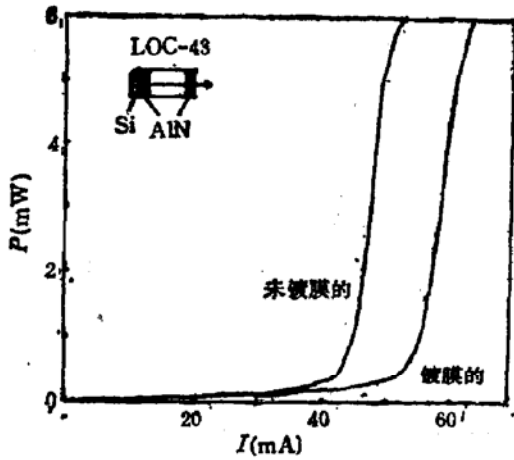


图 5 CW GaAs/GaAlAs 双异质结 LD 的光输出功率与电流的关系曲线

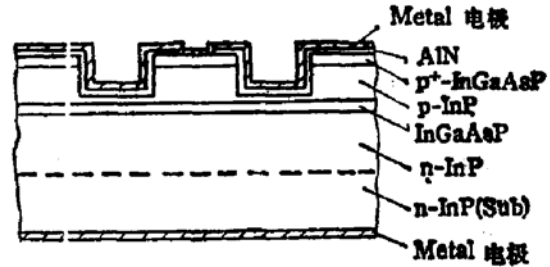


图 6 InGaAsP/InP DCRS 结构剖面示意图

电极得到 LD 芯片。用高倍显微镜观察,发现芯片表面和两侧面以及双沟底平面均被 AlN 膜均匀覆盖而且没有裂纹。最后解理芯片制作 LD,分别测量 LD 的性能。图 7 表示 CW 1.3 μ m InGaAsP/InP DCRS 双异质结测量的 LD 室温下电流-电压曲线和光输出功率-电流曲线。图 7(a)和(b)所示 LD 分别取自同一芯片不同部位解理制作而成,用 80nm AlN 膜做表面钝化膜。测量结果表明该类型 LD 阈值电流 I_{th} 范围在 52-72mA,外量子效率 η_d 为 30% 左右。在 87mA 处光输出功率 8.08mW。它们均具有典型的 LD 特性,说明溅射 AlN 膜做半导体光电器件表面钝化膜是成功的。

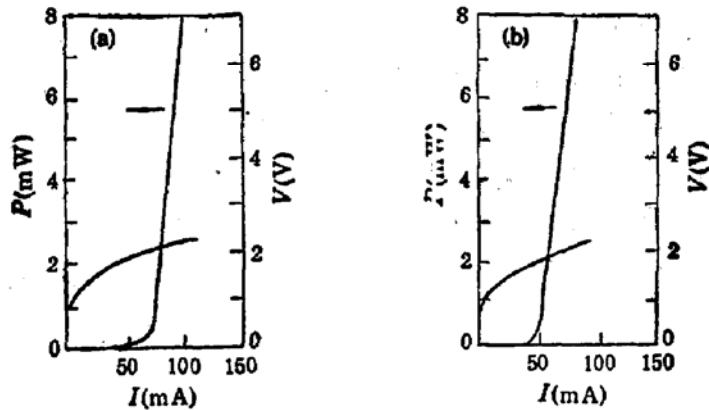


图 7 典型 LD 电流-电压曲线和光输出功率-电流曲线
(a) $I_{th} = 70.5\text{mA}$, $\eta_d = 30.7\%$, $V_m = 2.28\text{V}$; (b) $I_{th} = 51.9\text{mA}$,
 $\eta_d = 29.0\%$, $V_m = 2.17\text{V}$

已经知道高折射率介质膜比低折射率介质膜有较强的抗激光辐射能力和可耐较高的温度。另一方面,两种材料的热学参数越接近,它们之间易于匹配构成器件而且器件热学性能也较好。表 2 列出了室温下半导体光电器件材料 GaAs 和 InP 与常用的几种介质膜 (Al_2O_3 , SiO_2 和 Si_3N_4) 以及 AlN 膜的折射率 $n(\lambda = 633\text{nm})$ 、击穿电场强度 E_b 、热膨胀系数 α 和热导率 κ 的实验数据。对比表 2 所列数据看出, AlN 的 n 值最大, α 值最

表 2 GaAs, InP 和 Al₂O₃, SiO₂, Si₃N₄ 和 AlN 膜的折射率 $n(\lambda = 633\text{nm})$ 、
击穿电场强度 E_0 、热膨胀系数 α 和热导率 κ 的数据^[4,9-10,11]

	GaAs	InP	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Si ₃ N ₄	AlN
$n(\lambda = 633\text{nm})$	3.79	3.40	1.63	1.50	1.96	2.15
$E_0(\times 10^6 \text{ 伏/cm})$			7	4-8	11	4-9
$\alpha(\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$	5.8	4.5	9.0	0.3	2.5	5.6
$\kappa(\text{W/cm}^\circ\text{C})$	0.54	0.67	0.33	0.02	0.12	0.31

接近 GaAs 和 InP 的 α 值,可以预测 AlN 膜的使用将改善器件性能。还应指出使用 AlN 膜替代半导体器件工艺中用硅烷制备的膜,无疑对人类和环境都是有重大意义的。因此,我们相信 AlN 膜在半导体光电器件中将有广阔的应用前景。

四、结 论

用射频反应溅射方法制备了 AlN 膜。研究结果表明,溅射 AlN 膜厚度与氮气压强、放电电压和淀积时间有关。给定氮气压强和放电电压,AlN 膜厚度随淀积时间线性增加,而且溅射速率基本不变。溅射 AlN 膜折射率是 1.97($\lambda = 633\text{nm}$)。半导体表面淀积 AlN 膜后的反射率减小、相对透射光强增加。AlN 膜击穿电场强度随溅射条件略有变化,但其值均大于 1×10^6 伏/cm,说明溅射 AlN 膜是绝缘性能良好的一种理想介质膜。首次用 AlN 膜做 GaAs/GaAlAs 双异质结 LED 和 LOC LED 以及双异质结 LD 的端面保护和减反射膜获得成功,器件光输出功率明显增加而 LD 阈值电流明显下降。用 AlN 膜做器件表面钝化膜,成功地制作了双沟脊形波导结构的 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 双异质结 LD,实现了室温连续激射,其电流-电压曲线和光输出功率-电流曲线测量结果表明该类型 LD 具有典型 LD 的特征,说明溅射 AlN 膜是器件的一种新的表面钝化膜。比较分析 AlN 膜和几种常用介质膜与 GaAs 和 InP 的有关数据,发现 AlN 的参数最佳。故预期 AlN 膜在半导体光电器件中将有广阔应用前景。

参 考 文 献

- [1] 王德煌、徐万劲,中国激光,9,264(1988).
- [2] M. Ettenberg, *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 724 (1978).
- [3] 葛程远、周元庆等,第三届全国光纤通信学术会议论文集,145(1986).
- [4] J. Ungar, N. Bar-Chain and I. Urzy, *Electron. Lett.*, **22**, 279(1986).
- [5] 胡衍芝、顾德英,同上刊,164(1986).
- [6] 青木昌治主编,化合物半导体デバイス,東京出版社,268(1973).
- [7] Wang Dehuang and Guo Liang, Proc. of International Symposium on Optical Coating, May 23-25, 1989, Shanghai, China, 340 PV13 (1989).
- [8] M. 玻恩、E. 沃耳夫,光学原理(上),科学出版社,100(1978).
- [9] D. H. Wang, Proc. 172nd Meeting of the Electrochemical Society, Inc., Oct. 18-23, Hawaii, U. S.A., 575 (1987).

- (10) G. Unterbösch, H.G. Boch, *et al.*, *Appl. Surface Science*, **31**, 76 (1987).
(11) T. Niinu, T. Yamagushi, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-19**, 1021(1983).

AlN Films and Its Application in Optoelectronic Devices

Guo Liang, Zhu Suzhen, Zhang Xia and Yu Jinzhong

(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing*)

Wang Dehuang

(*Department of Physics Peking University*)

Abstract

The experimental results of sputtered AlN film and its application to semiconductor optoelectronic devices are reported. The thickness, deposition rate, refractive index and breakdown electric field of sputtered AlN films at different conditions were determined. Facet protectors, facet antireflectors and surface passivator of devices were successfully made by using sputtered AlN film for the first time. The analysis of the experimental data of the dielectric films used in the semiconductor optoelectronic devices shows that AlN film would be widely applied in this field.

Key words AlN, Semiconductor optoelectronic devices