

等离子体发射光谱诊断用于射频磁控溅射 GaP 薄膜的工艺参数优化^{*}

李阳平[†] 刘正堂

(西北工业大学材料学院, 西安 710072)

(2008 年 10 月 15 日收到, 2008 年 11 月 9 日收到修改稿)

以 GaP 为靶材、Ar 为工作气体, 采用射频磁控溅射法制备了厚层 GaP 膜. 对沉积过程中的辉光放电等离子体进行了发射光谱诊断, 发现只有 Ar I 发射谱线. 研究了工艺参数对发射谱线强度的影响规律, 并在此基础上通过同时改变射频功率、Ar 气流量及工作气压, 使 Ar I 发射谱线强度保持相同. 发现通过增大射频功率、减小工作气压而保持 Ar I 发射谱线强度不变可以提高 GaP 膜的沉积速率, 并使 GaP 膜的沉积工艺参数得到优化. 在优化后的工艺参数下制备出了符合化学计量比、红外透过性能好的厚层 GaP 膜.

关键词: GaP 薄膜, 射频磁控溅射, 等离子体发射光谱, 红外透射

PACC: 8115, 7820

1. 引 言

GaP 是 III-V 族化合物半导体材料, 具有良好的机械、抗腐蚀和红外透过性能, 在长波红外(8—12 μm)窗口、发光材料及光电子器件等方面有着广泛应用, 尤其适用于 ZnS 长波红外窗口的耐久性红外增透保护膜系^[1, 2]. GaP 作为耐久性红外光学薄膜已得到了大量研究, 为了提高其耐久性, 通常把 GaP 薄膜制备成较大厚度的薄膜. Klocek 等人采用外延和有机金属化合物化学气相沉积法(MOCVD)制备了外延及多晶 GaP 薄膜^[3, 4]. Gibson 等人采用反应溅射法(RS)及等离子体辅助化学气相沉积法(PACVD)制备了 GaP 薄膜^[5]. Dong 等人采用射频等离子体增强化学气相沉积法(RF-PECVD)制备了 GaP 薄膜^[6]. 在这些研究中, 通常把 PH_3 和 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ 用作先驱体, 而这两种气体是有毒危险物质, 因此在制备中需要进行特殊的防护.

射频磁控溅射是一种应用非常广泛的薄膜制备技术, 所制备的薄膜致密性好、附着力强. 但对于化合物靶来说, 由于靶材中各元素的溅射率不同, 往往使所制备的薄膜偏离化学计量比. 在射频磁控溅射

各工艺参数中, 衬底温度对薄膜生长过程有非常重要的影响; 其他工艺参数, 如射频功率、工作气压、气体流量等只对辉光放电产生直接影响, 从而对薄膜的生长及性质产生影响. 对射频磁控溅射中的辉光放电等离子体进行诊断分析, 可深入理解工艺参数对薄膜性质的影响规律. 发射光谱诊断是一种常用的重要诊断方法, 对等离子体不产生干扰, 非常适合于工艺过程中的原位诊断, 经常被用于薄膜沉积、表面改性及刻蚀等工艺过程的研究分析^[7-12]. 但大部分诊断是用来研究等离子体的电子温度及密度等等离子体参数, 把发射光谱诊断用于工艺参数优化的报道还很少见.

本文以 GaP 为靶材、Ar 为工作气体, 采用射频磁控溅射法制备厚度较大的 GaP 膜, 避免了有害气体的使用. 对沉积过程中的辉光放电等离子体进行了发射光谱诊断, 研究了工艺参数对等离子体发射谱线强度的影响规律, 并在此基础上进行了薄膜沉积的工艺参数优化, 制备出了符合化学计量比、且红外透过性能好的厚层 GaP 膜.

2. 实 验

用射频磁控溅射法制备 GaP 薄膜, 衬底为双面

^{*} 航空科学基金(批准号 2008ZE53043)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lyp6@163.com

抛光的热压 ZnS 圆片($\varnothing 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$), 靶材为单晶 GaP 圆片($\varnothing 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$), 工作气体为高纯 Ar (99.99%). ZnS 衬底先用丙酮浸泡并擦拭以除去抛光液及有机污染物, 然后用去离子水冲洗, 最后用酒精擦拭, 吹干后放在真空室内阳极上的试样夹中. 靶材被安装在射频阴极上. 衬底与靶之间的距离(靶基距) 固定为 60 mm. 真空室的背景真空度抽到 $< 3.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 时, 经过气体质量流量计通入一定流量的 Ar, 然后通过调节闸板阀开启的大小来调节抽气速率, 从而把真空室内的工作气压控制在要求的压强. 衬底背面用碘钨灯加热, 并自动控制在 390°C . 镀膜前对靶进行预溅射以除去表面污染物, 然后旋开衬底挡板开始镀膜.

等离子体发射光谱采用工作波段为 200—1200 nm、波长分辨率为 0.3 nm 的 OCEAN OPTIC 2000 光学多道分析仪进行测量, 测量装置如图 1 所示. 等离子体发射光从真空室的玻璃窗口透出后, 由凹面镜($\varnothing 100 \text{ mm}$, f 300 mm)进行反射及初步汇聚, 然后由石英凸透镜($\varnothing 25 \text{ mm}$, f 38 mm)成像, 最后由光纤传输至光学多道分析仪进行分光及数据采集, 采集到的数据被实时传输进计算机, 并由专门的分析软件生成光谱. 为采集到强的光谱, 光纤的耦合入口被置于辉光区所成的最小像处.

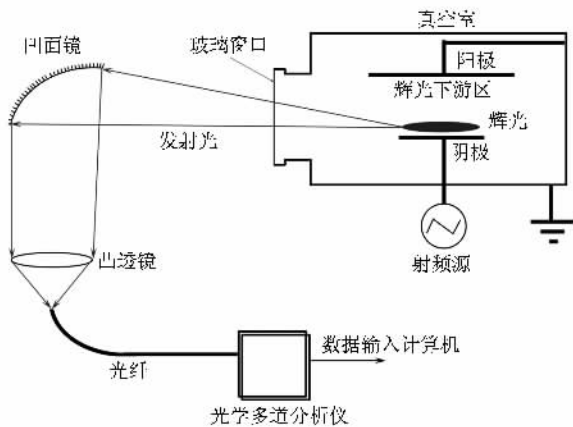


图 1 射频磁控溅射过程中等离子体发射光谱测量示意图

试样的红外透射光谱采用 Nicolet 60 SXR 傅里叶变换红外光谱仪进行测量. GaP 薄膜的成分采用 TESCAN VEGA \ \text{LMH} 扫描电镜中的能量色散 X 射线谱仪(EDS)进行分析.

3. 结果及讨论

3.1. 工艺参数对发射谱线强度的影响

图 2 是不同射频功率条件下的等离子体发射光谱. 这些光谱由分立谱线构成. 由于真空室内的气体原子包括 Ar 以及溅射出来的 P 和 Ga, 所以把等离子体发射谱线与 Ar, P, Ga 的原子发射谱线进行了对比, 如图 3 所示. 图 3(a) 中的等离子体发射谱线与图 3(c) 中的相同, 纵坐标为谱线的相对强度. Ar, P, Ga 的原子发射谱线及其相对强度分别在图 3(b), (c) 和 (d) 中给出^[13]. 为了便于比较, 在图 3(a) 中还给出了相关的 Ar, P, Ga 的原子发射谱线. 可以看出, 等离子体的发射谱线大部分是 Ar I 发射谱线, 有少量几条谱线同时与 Ar 和 P 或 Ar 和 Ga 的发射谱线接近. 为了确认, 又对射频磁控溅射 Ti 靶过程中的等离子体发射光谱进行了测量, 发现也出现了这几条谱线, 但 Ti 的原子发射谱线中并没有这几条谱线, 所以可以认为这几条谱线主要是 Ar I 发射谱线. 因此, 在 GaP 靶的溅射过程中并没有探测到 Ga 和 P 原子的发射谱线. 这主要是因为 GaP 是化合物靶, 其溅射率较低, 从而使真空室内的气相成分中 Ga 和 P 的含量很少, 所以它们的发射谱线很弱. 因此, 难以从等离子体发射光谱中判断气相成分中 P 和 Ga 原子的含量, 从而不能得到有关 GaP 靶材溅射情况及溅射原子输运情况的信息. 但从 Ar 的发射谱线中得到工艺参数对射频辉光放电的影响规律.

在图 2 中, 750.4 nm 处有一条最强谱线, 是 Ar 原子从激发态 $2p_1$ (电子能级为 13.42 eV) 到基态 $1s_2$ 跃迁的发射谱线^[14, 15], 这是 Ar 的一条持久线. 可以看出, 随着射频功率增大, 大部分 Ar I 发射谱线增强, 而 750.4 nm 处的持久线强度随射频功率增大尤其明显. 图 4 是不同 Ar 气流量条件下等离子体的发射光谱. 可以看出, 随着 Ar 气流量的变化, 750.4 nm 处的持久线强度变化不大, 而且其他 Ar I 发射谱线的强度随 Ar 气流量的变化也不太大, 且规律性不强. 图 5 是不同工作气压条件下等离子体的发射光谱. 当工作气压为 0.05 Pa, 0.07 Pa 和 0.08 Pa 时, 750.4 nm 处的持久线强度随工作气压的增大而增强, 但当工作气压增大为 0.3 Pa 时, 其强度又有所降低. 其他的 Ar I 发射谱线也有类似的变化规律.

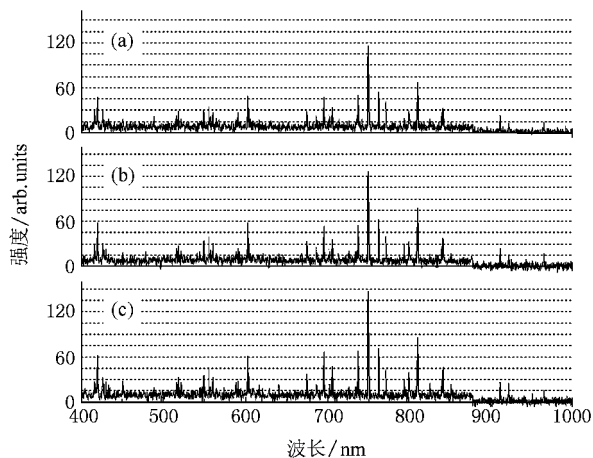


图2 不同射频功率条件下等离子体的发射光谱(Ar 气流量 15.0 SCCM, 工作气压 0.3 Pa) (a) 30 W (b) 40 W (c) 50 W

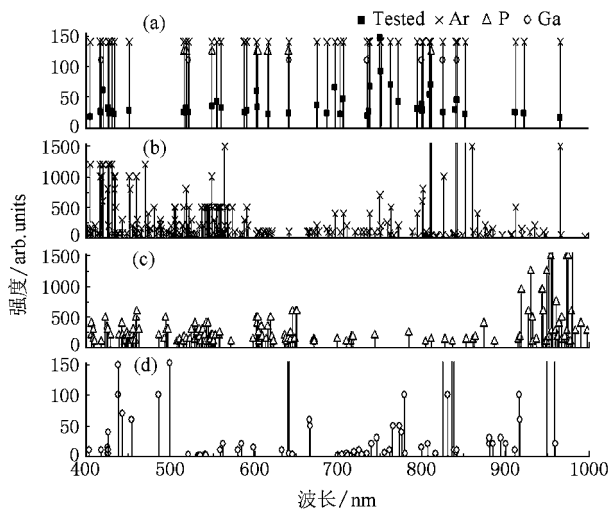


图3 等离子体发射光谱(a)与镓(b)、磷(c)及镓(d)原子的发射谱线

射频磁控溅射中的等离子体是低温等离子体, 其中电子温度很高, 而离子和中性粒子的温度很低. 等离子体中的原子发射光谱与电子温度 T_e 及电子的能量分布函数 $f(E)$ 密切相关, 发射谱线强度 I_{ij} 可表示为^[16]

$$I_{ij} = KA_{ij}N_j h\nu, \quad (1)$$

这里 K 为与仪器和测量有关的常数, A_{ij} 为电子从高能级 j 到低能级 i 的跃迁概率, N_j 为处于激发态 j (其电子能级为 E_j) 的原子数密度, h 为普朗克常数, ν 为发射谱线的频率. 通常情况下, $f(E)$ 可近似为麦克斯韦能量分布函数, 则可得^[16-19]

$$N_j = 4CN_e \sigma_j (kT_e - E_j)$$

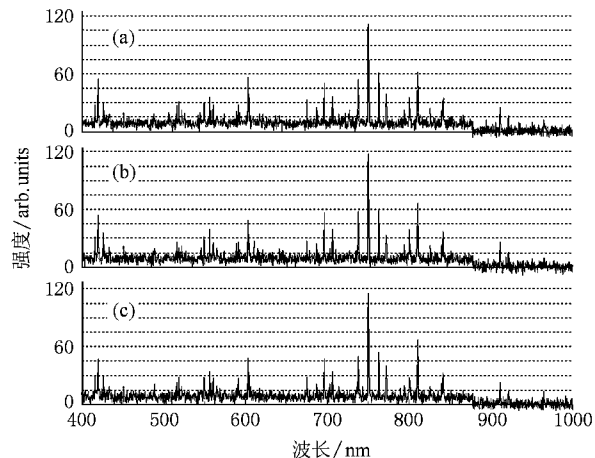


图4 不同 Ar 气流量条件下等离子体的发射光谱(射频功率 30 W, 工作气压 0.3 Pa) (a) 5.0 SCCM (b) 10.0 SCCM (c) 15.0 SCCM

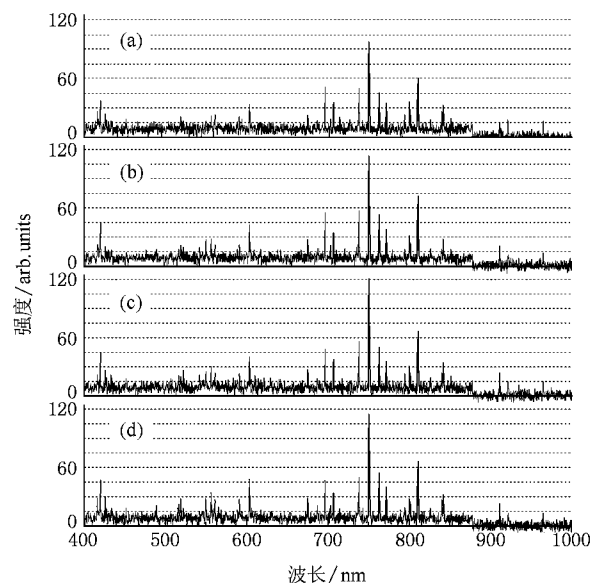


图5 不同工作气压条件下等离子体的发射光谱(射频功率 30 W, Ar 气流量 15.0 SCCM) (a) 0.05 Pa (b) 0.07 Pa (c) 0.08 Pa; (d) 0.3 Pa

$$\times \sqrt{\frac{m_e}{2\pi kT_e}} \exp\left(-\frac{E_j}{kT_e}\right),$$

$$I_{ij} = 4CKN_e A_{ij} \sigma_j h\nu (kT_e - E_j)$$

$$\times \sqrt{\frac{m_e}{2\pi kT_e}} \exp\left(-\frac{E_j}{kT_e}\right), \quad (2)$$

上式中, C 为与放电条件无关的常数, N 为等离子体中基态原子的数密度, N_e 为电子数密度, k 为玻尔兹曼常数, m_e 为电子质量, σ_j 为电子把原子从基态激发到激发态 j 的激发碰撞截面. 由于等离子体

的发射光谱是由相同的仪器在相同的配置条件下进行测量,所以在测量过程中 K 的变化不大.因此由 (2) 式可知,同一条发射谱线的强度随等离子体内的原子数密度、电子数密度以及电子温度的增大而增大.当射频功率增大时,电子从电场内吸收的能量将增加,从而使电子温度增大,这有利于电子对基态原子的激发,从而使原子的发射谱线增强.此外,电子温度增大也使电子对原子的电离作用增强,从而使等离子体内的电子数密度增大,这也促使了发射谱线的增强.工作气压增大,一方面使真空室内的原子数密度增大,从而使发射谱线增强;另一方面,发射谱线强度还与等离子体对谱线的吸收有关.当工作气压较低时,等离子体对谱线的吸收很弱,是光学薄等离子体;当工作气压升高时,等离子体的谱线吸收增强,逐渐变为光学厚等离子体,此时工作气压对发射谱线强度的影响是两方面作用的综合结果.因此,当工作气压为 0.05 Pa, 0.07 Pa 和 0.08 Pa 时发射谱线强度随工作气压的增大而增大,当工作气压为 0.3 Pa 时发射谱线强度有所减小.气体流量对谱线强度的影响不大,这可能是由于工作气压及气体流量较小,使得真空室内的气体流速比较低的缘故.

3.2 发射谱线强度相同时的工艺参数

射频磁控溅射的工艺参数对所制备薄膜的性质有着非常重要的影响,工艺参数优化是薄膜制备中重要的研究内容.本课题组曾采用射频磁控溅射法制备了红外透过性能良好的 GaP 薄膜,优化出了工艺参数^[20-21].但为了得到均匀致密的膜层,采用的射频功率较小,使 GaP 薄膜沉积速率低、所制备薄膜的厚度小.在优化出的工艺参数下制备厚层 GaP 膜时需延长沉积时间,且所制备的厚层膜透过性能变差.因此,试图在此工艺参数基础上把等离子体发射

表 1 波长为 750.4 nm 的 Ar I 发射光谱线强度相同时的不同工艺参数

	射频功率/W	Ar 气流量/SCCM	工作气压/Pa	衬底温度/°C	靶基距/mm	靶面自偏压/V
a	30	15.0	0.3	390	60	-103
b	70	6.6	0.08	390	60	-185
c	80	6.0	0.07	390	60	-216

图 7 是表 1 中不同工艺参数下 GaP 薄膜的沉积速率.当射频功率较小、工作气压较大时, GaP 膜的沉积速率较小;随射频功率增大、工作气压减小, GaP 膜的沉积速率增大.较大的沉积速率有利于提高较大厚度 GaP 膜的沉积效率.图 8 是 ZnS 衬底上沉积 GaP 膜前后的红外透过率曲线.通过对红外透

光谱诊断用于射频磁控溅射 GaP 厚层膜的工艺参数优化.

由于射频辉光放电等离子体发射谱线强度相同时,意味着辉光放电的强度相同.因此,在工艺参数优化时用发射谱线强度来监测辉光放电,通过保持不同工艺参数下 750.4 nm Ar I 持久线强度相同而使辉光放电维持相同的强度.根据 3.1 节中工艺参数对 Ar I 发射谱线强度的影响规律可知,同时提高/降低射频功率和减小/增大工作气压,可以使 Ar I 发射谱线强度保持不变.因为 Ar 气流量对谱线强度影响不大,所以为了便于控制,保持闸板阀开启的大小不变,而通过只调节 Ar 气流量来调节工作气压.图 6 是 750.4 nm Ar I 发射谱线强度相同时等离子体的发射光谱.可以看出,此时其他的 Ar I 发射谱线强度也几乎相同.表 1 是 750.4 nm Ar I 发射谱线强度相同时的不同工艺参数,其中 a 组工艺参数是先前优化出来的制备厚度较小的 GaP 薄膜的工艺参数.

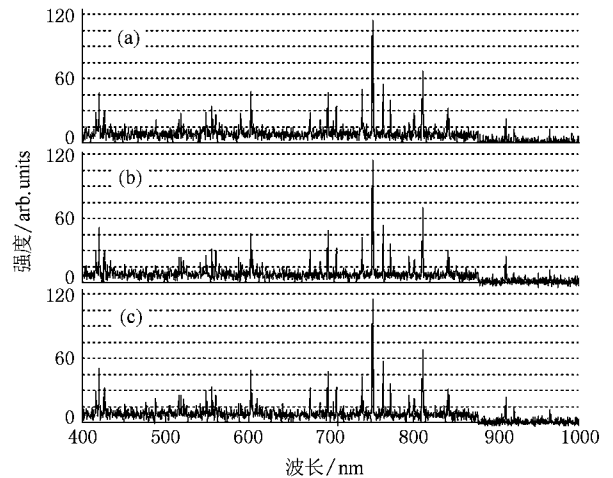


图 6 波长为 750.4 nm 的 Ar I 发射光谱线强度相同时等离子体的发射光谱

过率曲线进行拟合^[22],可得图 8 中的 GaP 膜在波长 10 μm (波数为 1000 cm^{-1}) 处的折射率约为 2.91,与块体材料的相近.薄膜(a)(b)(c)在波长 10 μm 处的吸收系数分别约为 87.9 cm^{-1} , 23.71 cm^{-1} , 8.28 cm^{-1} .厚度分别约为 1.2 μm , 14.3 μm , 14.8 μm .图 9 是表 1 中不同工艺参数下沉积的 GaP 膜的 EDS

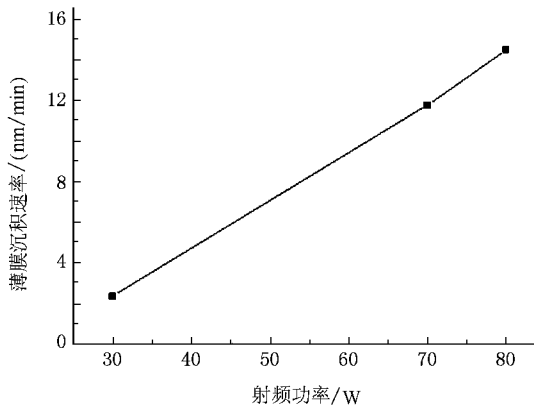


图7 表1中的不同工艺参数条件下 GaP 薄膜的沉积速率

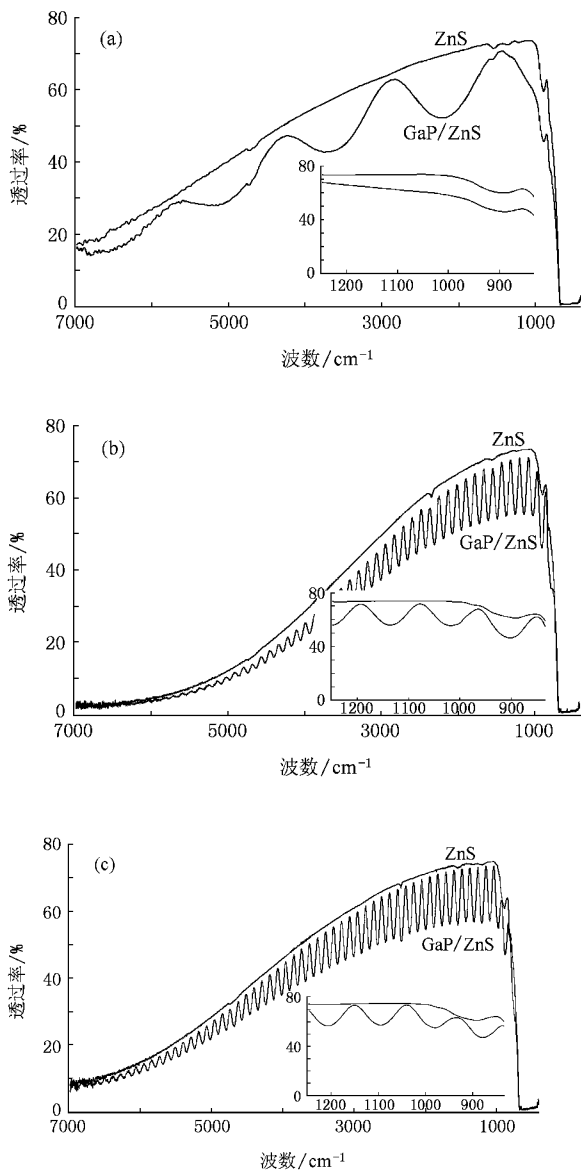


图8 表1中的不同工艺参数条件下所沉积 GaP 薄膜的红外透射率曲线

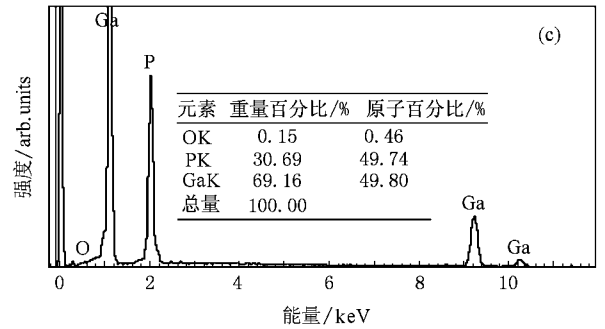
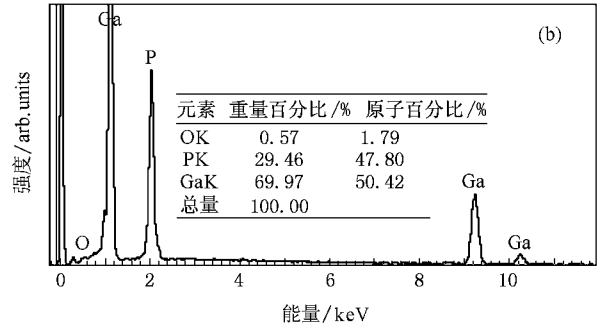
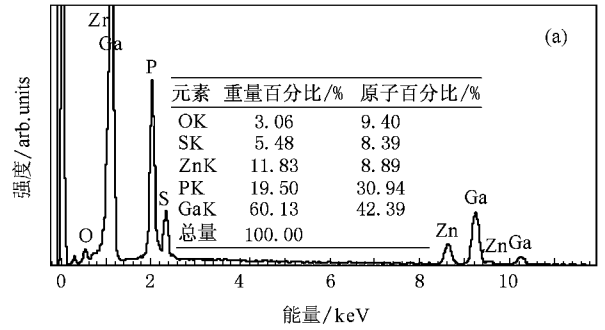


图9 表1中的不同工艺参数条件下所沉积 GaP 薄膜的 EDS 成分分析

成分分析.膜中除了 P 和 Ga 外,还有少量的 O.另外,在图谱(a)中出现了 S 和 Zn,这是由于 GaP 膜的厚度较小、电子穿透膜层后对衬底中的 Zn 和 S 产生了激发,但这并不影响测试结果中 P:Ga 相对含量比.薄膜(a)中,P 和 Ga 的原子百分比浓度分别为 30.94%和 42.39%,P:Ga 含量比为 0.73:1;薄膜(b)中 P:Ga 含量比为 0.95:1;薄膜(c)中 P:Ga 含量比接近 1:1.从图 8 和 9 可知,射频频率较小、工作气压较大时 GaP 薄膜中 Ga 的含量大于 P 的、薄膜吸收较大.随射频频率增大、工作气压减小,薄膜中 Ga 与 P 的含量接近化学计量比、薄膜吸收减小.从以上结果可以看出,通过增大射频频率、减小工作气压而保持 Ar I 发射谱线强度不变可以提高了薄膜沉积速率,并制备出了符合化学计量比、红外透过性能好的大厚度 GaP 膜,从而使 GaP 薄膜的沉积工艺得到了

优化.

由(1)式可知,发射谱线强度 I_{ij} 与激发态原子数密度 N_j 成正比,因此当保持 I_{ij} 不变时 N_j 也相等.由(2)式可知, N_j 与基态原子数密度 N 和电子数密度 N_e 成正比、随电子温度 T_e 增大而增大.当工作气压降低时 N 减小,因此必须通过增大 N_e 和 T_e 来使 I_{ij} 保持不变.在表 1 中,随射频功率增大,首先可以使 T_e 增大.另外从表 1 可以看出,随射频功率增大、工作气压减小,靶面自偏压增大.靶面自偏压是由于到达靶面的电子不能完全被离子中和而自动累积形成的.自偏压增大说明到达靶面的电子流密度增大,因此等离子体中的电子数密度 N_e 也增大. N_e 和 T_e 增大会使工作气体的电离度增加、离子数密度增大,从而使靶面离子流密度增加.靶面自偏压增大会使等离子体壳层对离子的加速电压增大,从而增大了入射离子的能量和溅射率,因此溅射原子的数量和逸出能量增大.工作气压减小,可以增大溅射原子的平均自由程,从而使更多的溅射原子输运到衬底,并且在输运过程中能量损失减小.因此,在表 1 中的不同工艺参数下,随射频功率增大 GaP 薄膜的沉积速率增加.另外,为了进一步研究表 1 中工艺参数的变化对 GaP 薄膜成分的影响机理,对薄膜的沉积过程进行了计算机模拟^[23].结果表明,GaP 靶中 Ga 的溅射率大于 P 的,当射频功率较小、工作气压较大时

Ga 的输运效率也大于 P 的,但增大射频功率同时减小工作气压使得 P 的输运效率大于 Ga 的,所以当射频功率较小、工作气压较大时 GaP 薄膜中 Ga 的含量大于 P 的,而随着射频功率增大、工作气压减小 GaP 薄膜中 Ga 与 P 的含量接近化学计量比.

4. 结 论

采用射频磁控溅射法,以 GaP 为靶材在 Ar 工作气氛中制备了厚层 GaP 膜.通过发射光谱诊断对沉积过程中的辉光放电等离子体进行了研究,发现只有 Ar I 发射谱线而没有 P 和 Ga 的发射谱线,发射谱线强度随射频功率增大而增强,当工作气压较小时发射谱线强度随工作气压的增大而增强,当工作气压太大时发射谱线强度反而减弱,Ar 气流量对发射谱线强度的影响不大.通过同时改变射频功率、Ar 气流量及工作气压,可使 Ar I 发射谱线强度保持相同.发现增大射频功率、减小工作气压而保持 Ar I 发射谱线强度不变可以提高 GaP 膜的沉积速率,并使 GaP 膜的沉积工艺参数得到优化.在优化后的工艺参数下制备出了厚层 GaP 膜,其中 P:Ga 原子含量比接近 1:1,GaP 膜在波长 10 μm 处的折射率约为 2.91,吸收系数约为 8.28 cm^{-1} .

- [1] Joseph S, Marcovitch O, Yadin Y, Klaiman D, Koren N, Zipin H 2007 *Proc. SPIE* **6545** 6545-T1
- [2] Gibson D R, Waddell E M, Wilson S A D, Lewis K L 1992 *Proc. SPIE* **1760** 178
- [3] Klocek P, Hoggins J T, Wilson M 1992 *Proc. SPIE* **1760** 210
- [4] Wilson M, Thomas M, Perez I M, Price D 1994 *Proc. SPIE* **2286** 108
- [5] Gibson D R, Waddell E M, Lewis K L 1994 *Proc. SPIE* **2286** 335
- [6] Dong L H, Sun Y J, He X Z 2007 *Proc. SPIE* **6722** 672201
- [7] Tang X L, Feng X P, Li Z G, Yan Y H, Qiu G 2004 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **24** 1437 (in Chinese) [唐晓亮、冯贤平、黎志光、闫永辉、邱高 2004 光谱学与光谱分析 **24** 1437]
- [8] Zhang F R, Zhang X D, Amanatides E, Mataras D, Zhao J, Zhao Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3022 (in Chinese) [张发荣、张晓丹、Amanatides E、Mataras D、赵静、赵颖 2008 物理学报 **57** 3022]
- [9] Chen F, Zhang X D, Zhao Y, Wei C C, Sun J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3276 (in Chinese) [陈飞、张晓丹、赵颖、魏长春、孙建 2008 物理学报 **57** 3276]
- [10] Yan J H, Tu X, Ma Z Y, Pan X C, Cen K F, Bruno C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3451 (in Chinese) [严建华、屠昕、马增益、潘新潮、岑可法、Bruno C 2006 物理学报 **55** 3451]
- [11] Li Y, Sun C W, Liu Z W, Zhang Q Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4236 (in Chinese) [李勇、孙成伟、刘志文、张庆瑜 2006 物理学报 **55** 4236]
- [12] Huang S, Xin Y, Ning Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1653 (in Chinese) [黄松、辛煜、宁兆元 2005 物理学报 **54** 1653]
- [13] NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD1>
- [14] Hope D A O, Cox T I, Deshmukh V G I 1987 *Vacuum* **37** 275
- [15] Chilton J E, Boffard J B, Schappe R S, Lin C C 1998 *Phys. Rev. A* **57** 267
- [16] Suzuki H, Nobata K 1986 *Jpn. J. Appl. Phys.* **25** 1589
- [17] Fuller N C M, Malyshev M V, Donnelly V M, Herman I P 2000 *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** 116
- [18] Kampas F J 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 2276
- [19] Sakurai T 1972 *Jpn. J. Appl. Phys.* **11** 1826

- [20] Guo D G , Liu Z T , Song J Q , Geng D S 2002 *Infrared Technology* **24**(4) 49 (in Chinese) [郭大刚、刘正堂、宋健全、耿东生 2002 红外技术 **24**(4) 49]
- [21] Guo D G , Liu Z T , Song J Q , Geng D S 2002 *Ordnance Material Science and Engineering* **25**(3) 30 (in Chinese) [郭大刚、刘正堂、宋健全、耿东生 2002 兵器材料科学与工程 **25**(3) 30]
- [22] Li Y P , Liu Z T , Zhao H L 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1589 (in Chinese) [李阳平、刘正堂、赵海龙 2006 光学学报 **26** 1589]
- [23] Li Y P , Liu Z T , Zhao H L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2937 (in Chinese) [李阳平、刘正堂、赵海龙 2007 物理学报 **56** 2937]

Plasma emission diagnostics for the optimization of deposition parameters in RF magnetron sputtering of GaP film^{*}

Li Yang-Ping[†] Liu Zheng-Tang

(School of Materials Science and Engineering , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)

(Received 15 October 2008 ; revised manuscript received 9 November 2008)

Abstract

GaP thick films were prepared on ZnS substrates by RF magnetron sputtering starting from a GaP target in an Ar atmosphere. Plasma emission diagnostics was employed to investigate the glow discharge during the deposition process. Only the emission lines of Ar atom appear and effects of the deposition parameters on the intensities of the emission lines were studied systematically. The deposition parameters were optimized through increasing the RF power and decreasing the working gas pressure of Ar simultaneously , with the intensity of the emission lines kept constant. And thus , stoichiometric GaP thick films with high IR transmission performance were deposited at an elevated deposition rate.

Keywords : GaP thin film , RF magnetron sputtering , plasma emission spectrum , infrared transmission

PACC : 8115 , 7820

^{*} Project supported by the Aviation Science Fund (Grant No. 2008ZE53043).

[†] Corresponding author. E-mail : lyp6@163.com