

金属氧化物薄膜的多离子束反应 共溅射模型(Ⅱ)*

数值计算与结果讨论

肖定全 韦力凡 李子森 朱建国 钱正洪 彭文斌

(四川大学材料科学系, 成都 610064)

(1994 年 10 月 8 日收到)

结合实验中的工艺技术参数, 以 Pb, Ti 两金属靶的反应共溅射为例, 对我们提出的金属氧化物薄膜的多离子束反应共溅射模型进行数值计算, 分别得出了各靶的溅射速率 R , 反应腔中反应气体分压 p 以及衬底上 Pb, Ti 的金属单质和氧化物所占的有效面积百分比与反应共溅射中直接可调的物理量, 即反应气体总量 Q 和溅射离子束流 J 的关系. 计算结果表明, 该模型揭示了反应溅射具有滞回效应的本质特征, 反映了反应共溅射中相关参数的相互影响与相互耦合的特点, 给出了薄膜中组分原子百分比及其氧化物的形态与溅射工艺的关系, 指出了多离子束反应共溅射中稳恒溅射的调控途径和方法. 该模型的数值计算结果均与已有的实验结果相符合.

PACC: 8155C

1 引 言

反应溅射(reactive sputtering)是制备化合物薄膜, 如氧化物、氮化物和碳化物薄膜的有效方法. 一些作者针对直流(DC)或射频(RF)磁控溅射, 或单离子束反应溅射, 结合具体的单组元反应溅射过程, 提出了相关的模型^[1-9], 得出了在单靶直流或射频磁控反应溅射中, 或单离子束反应溅射中, 溅射速率、反应气体分压及组元化合态与溅射工艺参数之间的关系. 结果表明, 反应溅射过程是一个复杂的非线性过程, 存在着滞回效应(hysteresis effect). 但只要溅射工艺参数选择适当, 溅射速率和薄膜组分的化合态仍可得到有效的控制.

最近, 我们独立提出并发展了多离子束反应共溅射技术^[10-13], 并以气体动力学为基础, 引入金属靶面及衬底表面上金属单质和氧化物有效面积百分比的概念, 在稳恒溅射的情况下, 建立了金属氧化物薄膜的多离子束反应共溅射模型^[14], 获得了溅射速率、反应气体分压以及薄膜组分与反应共溅射工艺参数之间满足的关系. 本文结合实验中的工艺技术参数, 以 Pb, Ti 两靶的反应共溅射为例, 对该模型进行了数值计算, 分别得出了各靶的

* 国家自然科学基金资助的课题.

溅射速率 R , 反应腔中反应气体分压 p 以及衬底上 Pb, Ti 的金属单质和氧化物所占的有效面积百分比与反应共溅射中直接可调的物理量, 即反应气体总流量 Q 及溅射离子束流 J 的关系. 计算结果表明, 该模型揭示了反应溅射具有滞回效应的本质特征, 反映了反应共溅射中相关参数相互影响与相互耦合的特点, 给出了薄膜中组分原子百分比及其氧化物的形态与溅射工艺的关系, 指出了多离子束反应共溅射中稳恒溅射的调控途径和方法. 该模型的数字计算结果均与已有的实验结果相符合. 利用该模型及数值计算的结果, 可以使采用多离子束反应共溅射技术制备多组分化合物薄膜的研究工作, 避免繁杂的炒菜式(trial and error)探索.

2 数值计算参数的选取

根据我们提出的多离子束反应共溅射模型^[14], 采用两个高纯金属靶(铅(Pb)和钛(Ti)), 在反应气体为氧气、工作气体为氩气时通过双离子束反应共溅射制备钛酸铅薄膜为例来进行讨论, 并设 Pb 靶为 1, Ti 靶为 2. 利用铅和钛两个金属靶, 采用双离子束反应共溅射制备 PbTiO_3 薄膜的具体实验条件是: 对 Pb 靶, 溅射离子(Ar^+)的能量一般为 700 eV; 对 Ti 靶, Ar^+ 的能量一般为 800 eV; Ar^+ 离子束以 45° 角轰击靶表面. 由文献[15]给出的溅射产额实验曲线, 对 Pb 靶, 取其单质的溅射产额 $S_{m_1} = 3$, 其氧化物的溅射产额 $S_{n_1} = 0.5$; 对 Ti 靶, 取 $S_{m_2} = 5$, $S_{n_2} = 0.6$. 在本模型中, J_i 表示溅射第 i 个靶的离子束流密度, 即溅射第 i 个靶的离子束流与离子束斑面积之比. 在实际的溅射工艺中, 对 Pb 靶, $J_1 = 0 \sim 80 \text{ mA/cm}^2$, 对 Ti 靶, $J_2 = 0 \sim 100 \text{ mA/cm}^2$. 类似于文献[5—7]的讨论, 设 Pb, Ti 金属单质对反应气体的反应吸附系数都取 1, 即 $\alpha_{tm_1} = \alpha_{tm_2} = \alpha_{sm_1} = \alpha_{sm_2} = \alpha_{cm_1} = \alpha_{cm_2} = 1$, 而 Pb 和 Ti 的低价氧化物进一步吸附氧生成高价氧化物的吸附系数为 0.5, 即 $\alpha_{sl_1} = \alpha_{sl_2} = 0.5$. 实验中, Pb 靶和 Ti 靶都是 $\phi 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆片. 因此, $A_{t_1} = A_{t_2} = 28.3 \text{ cm}^2$, 反应室可能接收溅射粒子的等效腔壁为 $\phi 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 衬底为 $\phi 20 \text{ mm}$ 的圆片或为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的方片. 因此, 计算中将衬底和腔室的总面积近似取作 $A = 630 \text{ cm}^2$. 实验装置采用的是 F-300 型分子泵, 其抽气速率 $s = 300 \text{ L/s}$. 一般而言, Pb 有两种氧化物形式, 即 PbO 和 PbO_2 , 而对 Ti, 其低价氧化物为 TiO , 高价氧化物为 TiO_2 , 所以, 取 $h_1 = 2$, $l_1 = 1$, $h_2 = 2$, $l_2 = 1$. 取金属靶的温度为 $T_{t1} = T_{t2} = 400 \text{ K}$, 衬底温度 $T_s = 600 \text{ K}$. 当面积 A 以 cm^2 为单位、压强 P 以 mTorr 为单位、温度 T 以 K 为单位、反应气体的分子质量 M 以 kg 为单位时, 经计算统一量纲所需的常数 $k_0 = 3.13 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2$.

下面根据本文作者提出的模型及上述参数, 给出利用计算机进行数值计算的结果, 并对结果进行讨论.

3 计算结果与分析

3.1 靶的溅射速率 R_i 与反应气体总流量 Q 及溅射离子束流密度 J_i 的关系

取 $J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$, $J_2 = 100 \text{ mA/cm}^2$ 时, 根据本模型计算得出的 Pb 靶和 Ti 靶的溅

射速率 R_1, R_2 与反应气体总流量 Q 的关系如图 1 所示. 由图 1 可知, 当反应气体流量在某一范围内时, 无论对 Pb 靶还是 Ti 靶, 其溅射速率 R_1, R_2 均与反应气体总量 Q 呈现滞回关系, 在图 1 中表现为 S 形回线. 文献[5—8]指出, 在反应溅射过程中, 靶的溅射速率与反应气体总流量间的滞回关系, 是反应溅射的普遍特征. 由本模型可以得出, 对多离子束反应共溅射, 各靶的溅射速率也是呈现这一特性. 图 1 中曲线的形状和走向也与文献[5—8]中由理论和实验得出的相类似. 由图 1 还可看出, 当 J_1, J_2 都恒定时, R_1-Q, R_2-Q 显示出滞回效应(简称为 S 形区)所在的反应气体总流量区间是一致的. 在 S 形区中, 反应溅射是不稳定的. 对一个给定的反应气体总流量 Q , 溅射速率可有不同的取值, 而且, Q 的少许变化, 对溅射速率也有较大影响.

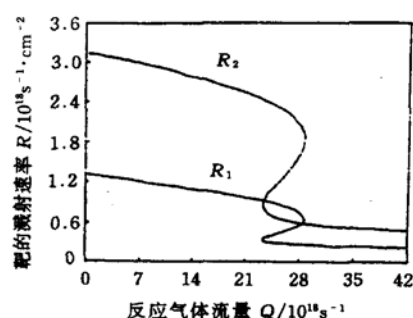


图 1 J_1, J_2 恒定时, Pb 靶和 Ti 靶的溅射速率 R_1, R_2 与反应气体总流量 Q 的关系示意图 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2, J_2 = 100 \text{ mA/cm}^2$)

当溅射离子流密度不同时, 不仅靶 1 和靶 2 的溅射速率 R_1, R_2 将发生改变, 而且 $R-Q$

Q 关系中滞回效应出现的反应气体总流量区也是不同的. 图 2(a)和(b)分别给出当 J_1 恒定 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$), 而 J_2 取不同值时, R_1, R_2 与反应气体总流量 Q 的关系. 由图 2(a)和(b), 可以看出:

1) 在双离子束反应共溅射中, 一个靶溅射离子束流密度的改变, 将直接影响两个靶的溅射速率及其与反应气体总流量的滞回效应, 并且使 $R-Q$ 曲线中与 S 形区对应的反应气体总流量 Q 发生改变, J_2 越大, 与 S 形区对应的 Q 值越高.

2) 当 J_1 恒定, 而 J_2 发生改变时, 尽管对靶 1 和靶 2 的溅射速率 R_1 和 R_2 都有影响, 但影响的方式是不同的. 对靶 1, 主要是使 $R-Q$ 曲线的 S 形区发生改变, 而对稳恒溅射区的溅射速率没有太大的影响; 对靶 2, 不仅使 $R-Q$ 曲线的 S 形区发生改变, 而且使整个溅射速率与 Q 的关系发生改变. 在数值计算选取的 J_2 范围内, J_2 越高, 溅射速率 R_2 越高.

3) 若仅考虑一个靶的溅射离子束流密度 (J_2) 的改变引起该靶的溅射速率 (R_2) 变化, 由本模型得出的结果[如图 2(b)]与 Berg 等^[5-8]对单靶溅射计算所得的结果类似. 计算中, 也

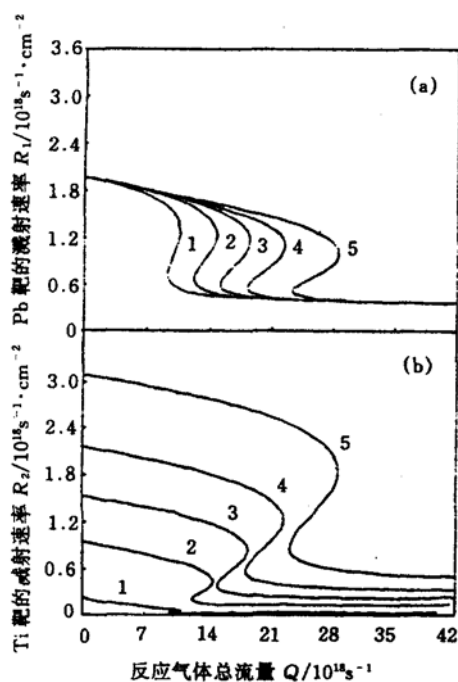


图 2 当 J_1 恒定 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$), J_2 取不同值时, 靶 1 和靶 2 的溅射速率 R_1 (图 a) 和 R_2 (图 b) 与反应气体总流量 Q 的关系. 曲线 1—5 分别表示 $J_2 = 7, 30, 50, 70, 100 \text{ mA/cm}^2$

曾在较低的离子束流密度($J_2 < 10 \text{ mA/cm}^2$)范围内选取不同的值进行计算, 结果表明, 此时不同的 J_2 值虽然对 R_2 有影响, 但 R - Q 曲线 S 形区对应的 Q 值改变不大. 从物理意义上考虑, 这是显而易见的, 因为在低离子束流范围内, 溅射粒子不多, 这些粒子吸附气体的量不大, 从而 S 形区对应的 Q 值改变不大.

3.2 反应气体分压 p 与反应气体总流量 Q 及溅射离子束流密度 J 的关系

当反应溅射的工艺条件处于靶的溅射速率与反应气体总流量的滞回曲线区, 即 S 形区时, 要获得稳恒溅射是很困难的. 这是因为在 S 形区, 反应气体分压 p 与反应气体总流量 Q 之间呈现负斜率关系, 这已为单靶反应溅射的理论和实验所证实^[5, 16-18]. 为了了解多离子束反应共溅射中 R - Q 滞回关系的原因, 我们也计算了在不同的溅射离子束流密度情况下反应气体分压 p 与反应气体总流量 Q 之间的关系. 图 3 给出当 $J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$, J_2 取不同值时, 计算得出的 p - Q 关系图. 由图 3 可以看出:

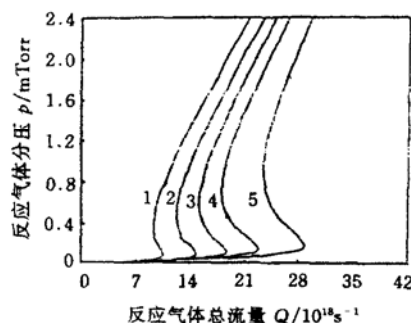


图 3 计算得出的在不同的离子束流密度下, 反应气体分压 p 与反应气体总流量 Q 的关系 $J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$, 其余图注同图 2

1) 在多离子束反应共溅射过程中, 反应气体分压 p 与反应气体总流量 Q 间也不是线性关系. 在某一 Q 区间, p - Q 呈现负斜率关系, 如同单靶反应溅射一样, 其原因是由于反应溅射过程中, 包括靶、衬底及被溅射粒子等整个系统对反应气体的吸附所致.

2) 对于给定的溅射离子束流(如图 3 中曲线 5, $J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$, $J_2 = 100 \text{ mA/cm}^2$), p - Q 呈现负斜率对应的 Q 区间, 正好是相应的 R - Q 曲线 S 形区所在的 Q 区间, 这一区间是反应溅射的非稳定区. 因此, 多离子束反应共溅射中的 R - Q 滞回效应, 也起源于溅射过程中整个系统对反应气体的吸附.

3) 当 J_2 值增大时, p - Q 曲线右移, 亦即出现滞回效应的反应气体总流量增加. 这一结论不难理解: 增大 J_2 即加强了对 Ti 靶的溅射, 从而增强了系统对气体的吸附能力. 这一结论也与单靶反应溅射的结论类似^[5]. 与单靶反应溅射相比, 在 S 形区中, p - Q 曲线的斜率的绝对值较大, 换言之, p 随 Q 的变化更为剧烈, 这有待于在不同的工艺条件下对多离子束反应共溅射的 p - Q 关系进行实际测量来加以验证; 而在 S 形区外的高 Q 值区, p - Q 曲线的斜率的渐近值由真空系统的抽气速率决定.

3.3 衬底上 Pb, Ti 的单质、低价氧化物和高价氧化物的有效面积百分比 (Z_{sm_1} , Z_{sm_2} , Z_{sl_1} , Z_{sl_2} , Z_{sh_1} , Z_{sh_2}) 与反应气体总流量 Q 及溅射离子束流密度 J 的关系

1) 当 J_1, J_2 恒定时的情形

图 4(a)~(c)分别给出当 $J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$, $J_2 = 100 \text{ mA/cm}^2$ 时, 计算得出的衬底上 Pb, Ti 的单质的面积百分比(Z_{sm_1} , Z_{sm_2})、低价氧化物的面积百分比(Z_{sl_1} , Z_{sl_2})和高价氧化物的面积百分比(Z_{sh_1} , Z_{sh_2})与反应气体总流量 Q 的关系. 由图 4 可见, 对应于图 1 中 R - Q 曲线的 S 形区, 各面积百分比与 Q 的关系也是呈现 S 形, 即当溅射工艺条件处于这一

区域时, 难于得出稳恒的面积百分比(由后文讨论可以得出, 此时也难于得出恒定的可重复的薄膜成分); 在低 Q 区, 衬底上以金属单质为主, 随着 Q 的增加, 衬底上金属单质所占的面积百分比降低, 而氧化物所占的面积百分比增加. 在高 Q 区, 衬底表面主要为金属的高价氧化物所覆盖. 衬底表面上 Pb, Ti 各物质形态所覆盖的有效面积百分比的具体数值与该材料的溅射产额 S_m 和 S_n 密切相关.

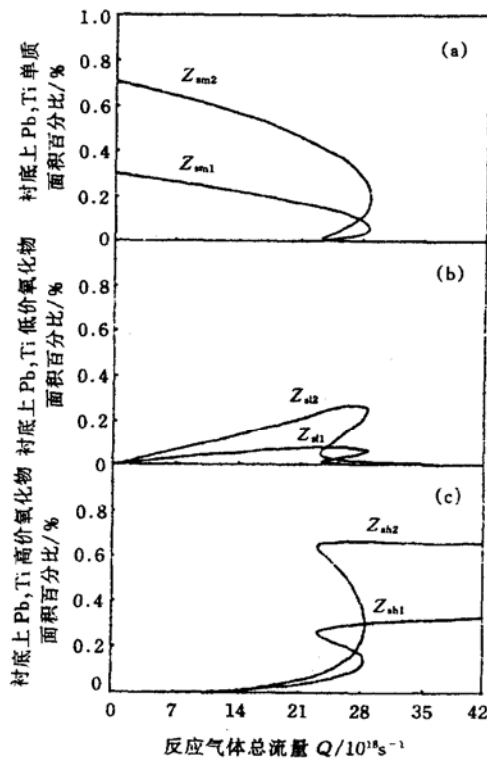


图4 当 $J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$, $J_2 = 100 \text{ mA/cm}^2$ 时, (a) 为衬底上 Pb 和 Ti 的金属单质的面积百分比 (Z_{sm1} , Z_{sm2}), (b) 为低价氧化物的面积百分比 (Z_{sl1} , Z_{sl2}), (c) 为高价氧化物的面积百分比 (Z_{sh1} , Z_{sh2}) 与反应气体总流量 Q 的关系

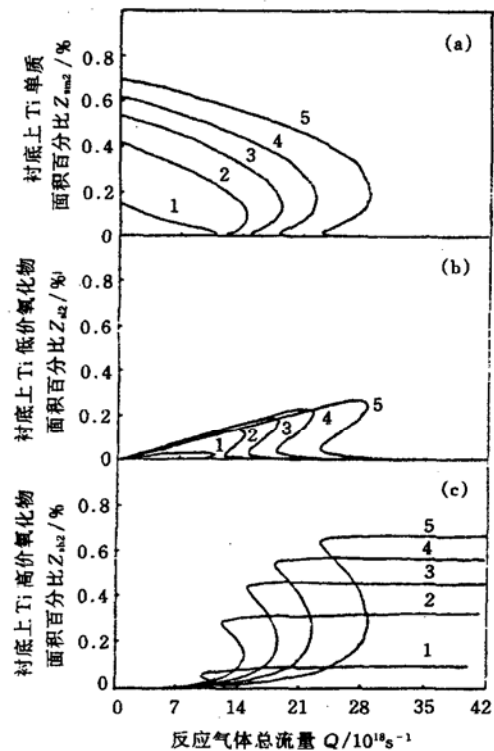


图5 当 J_1 恒定 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$), J_2 取不同值时, (a) 为衬底上 Ti 的单质, (b) 为低价氧化物, (c) 为高价氧化物所占面积百分比与反应气体总流量 Q 的关系 图注同图2

2) 当 J_1 恒定 ($J_1 \neq 0$), J_2 改变时的情形

图5(a)一(c)分别给出当 J_1 恒定 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$), 轰击 Ti 靶的 J_2 取不同值时, 衬底上 Ti 的单质、低价氧化物和高价氧化物所占的面积百分比 Z_{sm2} , Z_{sl2} , Z_{sh2} 与反应气体总流量 Q 的关系. 由图5可知, 各面积百分比与可独立控制的溅射参量 J 与 Q 之间的关系是相当复杂的, 但从中也可以发现一些规律性的结果: J_2 越高, 被溅射的 Ti 粒子越多, 衬底上相应的 Ti 的单质、低价氧化物或高价氧化物所占的百分比越高, 这正好反映了实际的溅射过程; 当 J_1 恒定, J_2 取不同值时, 反应溅射的不稳定区 (S 形区) 所对应的反应气体总流量 Q 的区间不同, J_2 越小, S 形区对应的 Q 值越低, 这可以认为, J_2 越低, Ti 靶溅

射的粒子越少,相应地吸附反应气体的量也越少所致.

值得指出的是,由于本模型讨论的是反应共溅射过程,因此,无论是改变哪个靶的溅射状况,都会对薄膜的最终形成产生影响.图6正好说明了这种情况.图6给出当溅射 Pb 靶的离子束流密度 J_1 恒定 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$),而溅射 Ti 靶的离子束流密度 J_2 取不同值时,在衬底上 Pb 靶的单质、低价氧化物和高价氧化物所占面积百分比的变化.由图6可见,随着 J_2 的增加,衬底上 Pb 的单质、低价和高价氧化物所占的面积百分比均减小.

完全类似地,可在 J_2 恒定的条件下,改变 J_1 的大小,计算出与图2—6相似的关系曲线.

3) 衬底上金属单质、低价和高价氧化物的有效面积百分比与薄膜组分及组分化合态的关系.

本模型讨论的是不同的溅射粒子在衬底上均匀、等密度的沉积过程.因此,图4—6的相应面积百分比,实际上代表了薄膜中相关组分的原子百分比及金属氧化物的形式.例如,在反应气体总流量不太高时,由图5(a)和图6(a)给出的 Pb 和 Ti 两种金属单质在衬底上所占面积百分比,可以确定薄膜中这两种金属元素的原子比.对制备 PbTiO_3 薄膜而言,要求 Pb:Ti 原子比为 1:1,由图5(a)和图6(a)可以算出此时所需的离子束流密度 J_1 和 J_2 的大小.针对 Pb 和 Ti 两种金属靶的反应共溅射,结合工艺条件及薄膜的成分分析,已验证了这一点.当反应气体总流量提高时,由图5(a)—(c)及图6(a)—(c)还可直接估算出薄膜中不同金属氧化物的比例与价态.

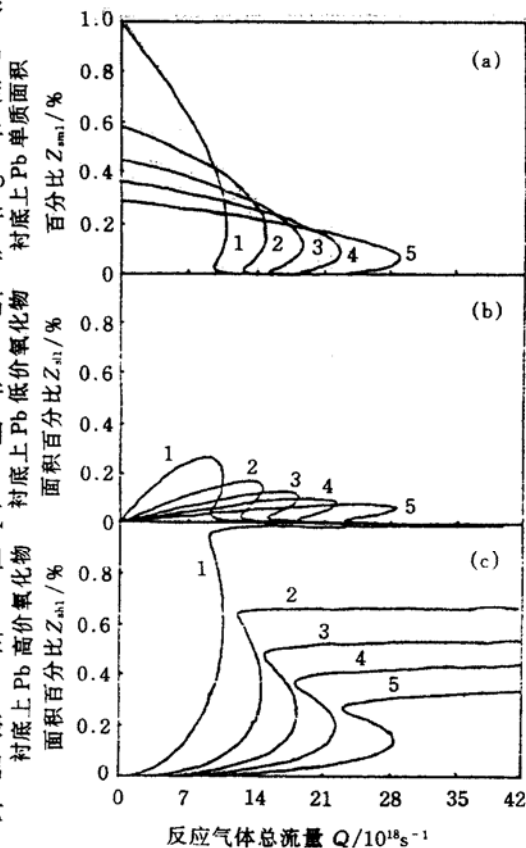


图6 当 J_1 恒定 ($J_1 = 70 \text{ mA/cm}^2$), (a) 为 J_2 取不同值时,衬底上 Pb 的单质, (b) 为低价氧化物, (c) 为高价氧化物所占面积百分比与反应气体总流量 Q 的关系. 图注同图2

4 讨 论

1. 反应溅射是一个复杂的非线性过程,多靶反应共溅射的过程更为复杂.本文及与之相关的文献[14],基于我们发展的多离子束反应共溅射技术,提出了金属氧化物的多离子束反应共溅射模型,并以双离子束分别同时溅射 Pb, Ti 两个金属靶为例,结合实际的工艺参数,利用计算机编程进行了数值计算,分别得出了各靶的溅射速率 R_i , 反应气体分压

ρ , 以及衬底上 Pb 和 Ti 的单质和氧化物所占面积百分比与反应共溅射中直接可调的物理量, 即反应气体总流量 Q 与溅射离子束流密度 J_i 的关系。

2. 计算得出的 R - Q 曲线的滞回效应(S 形区)表明, 该模型给出了反应溅射中靶的溅射速率与反应气体总流量间具有滞回效应这一本质特征。在多靶反应共溅射中, 各靶的 R - Q 都具有滞回特性, 在各靶的溅射离子束流密度给定的情况下, 各靶的滞回效应发生的反应气体总流量 Q 所在的区间是相同的; 而当个别离子束流密度发生变化时, S 形区所对应的反应气体总流量 Q 将发生改变; 在多靶反应共溅射中, 只要改变其中任何一个靶的溅射离子束流密度, 都将影响各靶的溅射速率。这些结果表明, 在多靶反应共溅射中, 多靶之间是相互耦合、相互影响的。

3. 本模型假设不同组分在衬底上均匀、等密度地沉积, 并引入了衬底上各组分的单价、低价氧化物和高价氧化物所占的面积百分比 Z_{smi} , Z_{sli} 和 Z_{shi} 的概念。实际上, 这些面积百分比代表了薄膜中相关组分的原子百分比及其金属氧化物的形式。由此可见, 本模型给出了薄膜中各组分的化学配比与相关溅射工艺条件, 特别是反应气体总流量 Q 与溅射离子束流密度 J_i 之间的关系。

4. 根据本模型进行数值计算得出的所有 R - Q , P - Q , 及 Z - Q 曲线(图 1—6), 都显示了滞回特性(S 形区), 而 S 形区正是反应溅射的非稳定区。即使在单靶反应溅射的情况下, 要在 S 形区获得稳恒溅射也是很困难的^[5-8]。为了实现稳恒的多离子束反应共溅射, 应当仔细研究在 S 形区之中的溅射状态。事实上, 由图 4—6 可知, 在 S 形区内, 有关组分的单质和氧化物的面积百分比不仅由 Q 值决定, 还与到达该点的 Q 值的路径(指 Q 值由小到大或由大到小的路径)有关。对于一个确定的 Q 值, 如果知道了到达此值的路径, 各面积百分比还是可以确定的。特别是, 在 S 形区内, 各面积百分比变化范围较大, 这为调控薄膜中各组分的比例(从而调控薄膜的化学剂量比)提供了可能。可以设想, 若在装置设计中增加反馈控制系统, 将为保证系统稳定工作于 S 形区、并能按要求改变薄膜的化学剂量比带来方便。

5. 采用高纯金属的 Pb, Ti, La 靶, 利用多离子束反应共溅射技术制备 (Pb, La)TiO₃ 铁电薄膜已有多年。本模型数值计算的主要结果在定性上均与实验结果相符合, 而且, 利用改变轰击 Pb, Ti 靶的离子束束流密度调控 PbTiO₃ 薄膜组分配比的工作, 可与本模型进行定量比较。不过, 要从实验上完全得出类似于图 1—6 给出的数值计算曲线, 需要大量的实验研究与分析, 尤其是需要对靶的溅射速率、反应气体分压、及薄膜成分和组分价态进行精确的测量, 这也不是几篇论文所能包容的内容, 有关工作正在进行之中。

需要指出, 在本模型的建立过程中, 将靶的溅射产额视为常数, 这在具体的溅射系统和特定的溅射条件下是正确的; 当溅射条件变化范围较大时, 只能近似地认为靶的溅射产额为常数。还需要指出, 由本模型的建立过程可知, 单靶反应溅射可视为本模型中靶数为 1 的特例。

[1] F. Shinoki and Itoh, *J. Appl. Phys.*, **46**(1975), 3381.

[2] T. Abe and T. Yamashina, *Thin Solid Films*, **30**(1975), 19.

[3] G. Lemperiere and J. M. Poitevin, *Thin Solid Films*, **111**(1984), 339.

[4] A. E. Eltoukly, B. R. Natarajan, J. E. Greene and T. L. Barr, *Thin Solid Films*, **69**(1980), 229.

- [5] S. Berg, H.-O. Blom, T. Larsson and C. Nender, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A5**(1987), 202.
- [6] S. Berg, T. Larsson, C. Nender and H.-O. Blom, *J. Appl. Phys.*, **63**(1988), 887.
- [7] T. Larsson, H.-O. Blom, C. Nender and S. Berg, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A6**(1988), 1832.
- [8] S. Berg, H.-O. Blom, M. Moradi, C. Nender and T. Larsson, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A7**(1989), 1225.
- [9] M. Yoshitake, K. Takiguchi, Y. Suzuki and S. Ogawa, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A6**(1988), 2326.
- [10] D. Q. Xiao, Z. L. Xiao, J. M. Zhu, D. R. Wan, H. C. Guo, B. Z. Xie and H. Yuan, *Appl. Phys. Lett.*, **58**(1991), 36.
- [11] D. Q. Xiao, J. M. Zhu, J. G. Zhu, Z. L. Xiao, Z. H. Qian and H. L. Zhang, *Ferroelectrics*, **141**(1993), 327.
- [12] 肖定金、肖志力、朱居木、郭华聪, 多组元金属氧化物薄膜的制备方法, 中国发明专利, 90105788.6, (1990).
- [13] 郭华聪、肖定金、谢必正、邵启文、朱居木、肖志力, 用离子束溅射成膜的装置, 中国发明专利, 88109745.4, (1989).
- [14] 肖定金、韦力凡、李子森、朱建国、钱正洪、彭文斌, 物理学报, **45**(1996), 本刊本期.
- [15] R. Behrisch, *Sputtering by Particle Bombardment (I)* (Springer-Verlag, Berlin, 1978), ch. 4.

MODELLING OF MULTI-ION-BEAM REACTIVE COSPUTTERING OF METAL OXIDE THIN FILMS (II) NUMERICAL CALCULATION AND RESULTS DISCUSSION

XIAO DING-QUAN WEI LI-FAN LI ZI-SEN ZHU JIAN-GUO

QIAN ZHENG-HONG PENG WEN-BIN

(Department of Materials Science, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 8 October 1994)

ABSTRACT

The numerical calculation for the model of a multi-ion-beam reactive cosputtering (MI-BRECS) system which we presented very recently in a related paper has been carried out with the parameters adopted in our experiments to prepare PbTiO_3 thin films by using Pb and Ti metal targets and MIBRECS technique. The relationships among the sputtered ratio R_i of each target, the partial pressure p of reactive gas in the deposition chamber, and the coverage ratios Z_{smi} , Z_{sli} , and Z_{shi} of the simple substances and oxide compounds of Pb and Ti on the substrate surface, with the total reactive gas flux Q and the densities J_i of the sputtering ion beam (both of which can be adjusted independently) are obtained respectively. The calculated results reveal the hysteresis effect which is an essential characteristics in a reactive sputtering, and show that there is a coupling and interaction among the processing parameters in ion beam reactive cosputtering. The relations among the atom ratio and the chemical valences of the elements in prepared thin films with the controllable processing parameters in ion beam reactive cosputtering are obtained, and the method to control and adjust a MI-BRECS system for stable reactive cosputtering process is pointed out. The obtained results agree with our experiments.

PACC: 8155C