

掺钼 ZnO 透明导电薄膜的太赫兹 电磁波传输性质*

吴臣国¹⁾ 沈 杰^{1)†} 李 栋²⁾ 马国宏²⁾

1) 复旦大学材料科学系, 上海 200433)

2) 上海大学物理系, 上海 200444)

(2009 年 4 月 2 日收到, 2009 年 4 月 21 日收到修改稿)

采用直流磁控反应溅射方法, 通过调节氧分压在玻璃基底上制备了不同载流子浓度的掺 Mo 的 ZnO (ZMO) 透明导电薄膜. 应用太赫兹电磁波时域光谱技术研究了 ZMO 导电膜的太赫兹电磁波透射性质及介电响应, 得到了与频率相关的电导率、能量吸收和薄膜折射率, 实验结果与经典 Drude 模型相符很好. ZMO 导电膜的太赫兹电磁波脉冲透射性质表明, 通过调节 ZMO 薄膜的载流子浓度, 该导电膜可作为应用于衬底和光学器件等太赫兹电磁波频率范围的宽带抗反射涂层.

关键词: 太赫兹电磁波光谱, 薄膜电导率, 宽带抗反射, 透明导电薄膜

PACC: 7865K, 4280X, 8115C

1. 引 言

透明导电氧化物 (TCO) 薄膜由于具有高的可见光透射率和低的电阻率, 在平板显示、触摸显示屏、太阳能电池、抗静电涂层、发热器、防结冰装置、光学涂层以及透明光电子器件等方面具有广阔的应用前景^[1,2], 其中的代表性薄膜是 In_2O_3 :Si (ITO), SnO_2 :F 和 ZnO :Al (ZAO) 薄膜, 它们都具有良好的光电性能.

ZnO 的光学禁带宽度约为 3.37 eV, 对可见光的透明性很好, 而且 Zn 的蕴藏丰富, 无毒, 价格便宜, 比 ITO 更容易蚀刻. 因此, 近十几年来 ZnO 已成为 TCO 薄膜的研究热点, 有望成为平板显示器中 ITO 薄膜电极的替代材料^[3,4]. 不掺杂的 ZnO 透明导电薄膜虽然电阻率可以低至 $4.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 但是在温度超过 150°C 后薄膜性能就会变得不稳定, 而掺入 B, F 和 Al 等杂质后其热稳定温度可以分别提高到 250, 400 和 500°C 以上^[4-6]. ZnO 基透明导电薄膜中可以掺入的元素包括 B, Al, Ga, In, Sc 和 Y 等第 III 族元素, 以及 Si, Ge, Sn, Pb, Ti, Zr 和 Hf 等第 IV 族元素, 此外也可以掺 F⁻ 替代 O²⁻. 其中 ZnO :Al 薄膜得

到了广泛和深入的研究, 目前已经在平板显示器和薄膜太阳能电池中得到了应用. 近来, ZnO :Ga 薄膜也开始受到重视, 但关于高价态元素掺杂 ZnO 基透明导电薄膜的报道还很少, 仅有王三坡等^[7]和 Xiu 等^[8]分别利用金属靶直流反应磁控溅射方法和陶瓷靶射频磁控溅射方法制备了 ZnO :Mo 透明导电薄膜, 且这些研究主要集中在薄膜的电学性能上, 对薄膜的光学性能讨论很少, 特别是对透明导电薄膜的太赫兹电磁波 (THz) 光谱性质的研究目前尚未见报道.

近年来, 由于各种 THz 器件的制备和操控 THz 辐射方面的应用, 对 THz 穿透导电薄膜的研究引起了越来越多的重视^[9-15]. 从应用角度看, THz 波长范围的各种光学元器件如分光镜、波片、起偏镜和色散光学元件都可通过制备一层半导体薄膜实现. 同时通过在基体上设计合适的导电薄膜, 可以操控 THz 的波前和波形^[16-18]. 而 TCO 薄膜作为一种半导体导电薄膜, 由于具有高的可见光透射率和低的电阻率, 除了在常规的平板显示及透明电子器件等领域的应用外, 也可以用于 THz 器件领域. 我们知道, 电磁波穿过不同折射率 n_1 和 n_2 的界面时会发生反射. 电

* 上海市应用材料研究与发展基金(批准号: 07SA13) 国家自然科学基金(批准号: 10774099) 上海市高等学校特聘教授(东方学者) 岗位计划(批准号: S30105) 和上海市重点学科建设基金(批准号: B113) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: shenjie@fudan.edu.cn

磁波从光疏介质(空气,折射率为 n_a)穿过光密介质(基底,折射率为 n_s)时,反射波相位相对入射波有 π 相位的位移.如果两种介质被一层导电薄膜分隔开,情况将变得复杂,反射波的相位将与系统的光学阻抗有关系^[19].正如文献[20]中所指出,在一个基底-导电膜-空气体系的界面,反射波的相位由 $\Delta n = n_s - n_a - Z_0 \sigma d$ 决定,其中 Z_0 为自由空间的阻抗, d 和 σ 分别是薄膜厚度和电导率.当 $\Delta n > 0$ 时,反射波相对入射波无相位改变;当 $\Delta n < 0$ 时,反射波相对入射波出现 π 相位的变换;而当 $\Delta n = 0$ 时阻抗匹配,界面反射将被抑制.在这里, n_s , n_a 和 Z_0 为常数,因此界面的反射性质可以通过改变薄膜电导率来控制,文献[20]通过不同厚度的超薄金属薄膜来实现这种阻抗匹配.

本文采用第 VI B 族的高价态元素 Mo 掺入 ZnO 薄膜,采用可控性好、沉积速率高的反应直流磁控溅射法,用 Zn 中镶嵌 Mo 的金属靶,在 O_2 气和 Ar 气混合气氛中在普通玻璃基板上沉积 ZnO:Mo 透明导电薄膜,并着重研究了 ZMO 薄膜的 THz 透射性质.通过调节薄膜的载流子浓度(电导率 σ),可以人为控制在玻璃-空气界面的宽带 THz 脉冲的内部反射.

2. 实 验

2.1. 样品制备

使用北京仪器厂的 DM450-A 型镀膜机,自制磁控溅射器,采用直流磁控反应溅射技术在玻璃基片上制备 ZnO:Mo 透明导电薄膜.溅射靶是自制的金属 Zn 和 Mo 的镶嵌靶,直径为 60 mm,厚度为 3 mm,与基板距离 65 mm.沉积薄膜前,先将反应室抽到压强小于 3.0×10^{-3} Pa,然后通过可变气导阀将一定比例的 Ar 气和 O_2 气充入反应室,工作压强为 1.0—2.0 Pa,基板温度维持在 100—350°C 之间.通过调节 O_2 气分压来得到不同载流子浓度的薄膜.

2.2. 样品测试

用 ET3000 型台阶仪测量薄膜的厚度,用 DB-90 型四探针仪测量样品的方块电阻,计算得到薄膜的电阻率.在室温下用 van der Pauw 法测量薄膜的 Hall 迁移率,并得到薄膜的载流子迁移率和载流子浓度.用美国 Park Scientific Instrument 公司生产的非接触模式 2 nN 原子力显微镜(AFM)分析薄膜的表面形

貌.用 Philips 公司生产的 PW1710 型 X 射线衍射仪(Cu $K\alpha$ 靶,30 kV,20 mA,射线源波长为 0.1542 nm)分析薄膜的晶态结构.

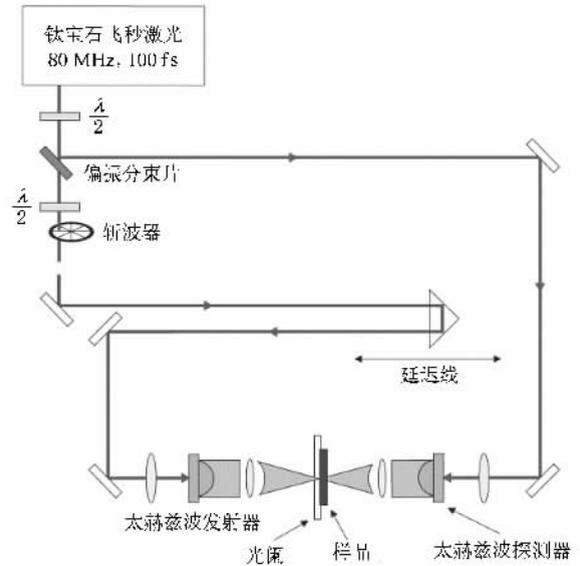


图 1 THz 测试光路图

对于 THz 时域光谱测量,用如图 1 所示的传输光路的标准 THz 时域分光计来表征薄膜在 0.1—1 THz 频率范围的传输特性.用锁模钛宝石飞秒激光器输出的激光用来产生和探测 THz 的时域谱.激光的脉冲宽度为 100 fs,中心波长为 800 nm,重复速率为 80 MHz.产生的 THz 脉冲通过一个 Si 透镜校准为平行光束,再通过聚乙烯镜头把平行光束聚焦于放置样品位置,光束焦点直径大约为 6 mm;透过的 THz 光束再由另一个聚乙烯镜头校准为平行光,最后 THz 光束被与 THz 探测器连接在一起的另一个 Si 镜头收集.通过一个可变的光路延迟,THz 发射器产生的 THz 脉冲可以根据门探测器而连续的延迟,这样就能允许我们短暂扫描它们的电场.对于 THz 时域光谱的应用,测试了通过样品的 THz 脉冲和不通过样品(空气)参考脉冲两种电磁脉冲.然后通过 Fourier 分析便可获得样品的折射率及与频率相关的吸收率.

3. 结果与讨论

3.1. ZMO 透明导电薄膜的制备及其性质

ZMO 透明导电薄膜样品的 Mo 掺杂浓度均为 1.7wt%.样品的电阻率通过调节溅射时的 O_2 气流

量与 Ar 气流量之比得到控制. 载流子浓度、电阻率和载流子迁移率与溅射时 O₂ 气流量与 Ar 气流量之比的关系如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 在保证薄膜透明性好的前提下, O₂ 气分压越小得到的薄膜中空位较多, 因而载流子浓度越大, 电阻率也就越低, 最小电阻率为 $9.4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. 而载流子迁移率并没有明显的变化. 由此可以通过调节 O₂ 气分压制得不同的载流子浓度和电阻率的 ZMO 薄膜.

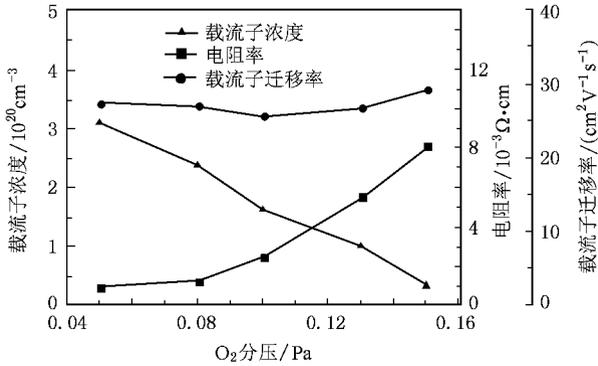


图2 载流子浓度、电阻率和载流子迁移率与 O₂ 气分压的关系

图3是 ZMO 薄膜样品的 AFM 扫描图, 薄膜厚度为 150 nm. 制备条件为 Mo 掺杂含量为 1.7wt%, 基板温度为 200°C, 溅射电流为 200 mA, 工作压强为 1.0 Pa, O₂ 气分压为 0.1 Pa. 该样品薄膜表面的平均粗糙度为 4.82 nm, 方均根粗糙度为 6.11 nm, 可见 ZMO 薄膜表面平整, 薄膜表面颗粒连续致密. 同时利用 X 射线衍射仪表征 ZnO:Mo 薄膜, 显示其特征谱线与 ZnO 薄膜六角纤锌矿结构的特征谱线相符合^[7], 表明在掺入 Mo 原子以后, ZnO 薄膜并没有改变其结构或形成新的晶格结构, 说明 Mo 是以替代 Zn 的形式而形成 ZMO 薄膜. 最强的 ZnO(002) 晶面衍射峰出现在 2θ 为 34.3° 附近, 较弱的 ZnO(004) 晶

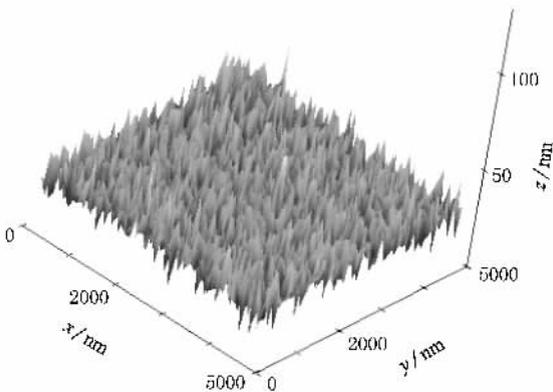


图3 ZMO 薄膜的 AFM 像 膜厚 $d = 150 \text{ nm}$

面衍射峰出现在 2θ 为 72.3° 附近, 并且(002)晶面衍射峰强度比(004)晶面衍射峰强度大 100 倍左右, 表明 ZMO 薄膜具有良好的 c 轴取向. ZMO 薄膜(002)衍射峰的半高宽(FWHM)只有 0.36° 左右, 表明薄膜具有良好的结晶性能, 计算得到的晶粒尺寸大约为 22.2 nm.

3.2. ZMO 透明导电薄膜的 THz 光谱性质

图4所示为自由空间、玻璃基底和在玻璃基底上镀有 ZMO 透明导电薄膜的 THz 时域电场传输曲线, 其中 ZMO 薄膜为根据需要的三个不同载流子浓度的样品, 样品参数见表 1, 其中载流子浓度 n 、薄膜厚度 d 和载流子迁移率 μ 由上述测试方法测得. 等离子体振荡频率 ω_p 和衰减系数 γ 则分别通过计算获得.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}},$$

$$\gamma = 1/\tau = e\hbar(m^* \mu).$$

其中 m^* 为载流子的有效质量. 由表 1 可见, 虽然所制备的 ZMO 薄膜的载流子浓度有数量级的变化, 但载流子迁移率并没有太大的变化. 从玻璃基底的结果(图 4(a))可以看出, 在主脉冲之后大约 19 ps 的位置出现一个较弱的脉冲, 这是在玻璃-空气界面内部第一次的反射脉冲. 对于镀有不同载流子浓度的 ZMO 薄膜样品, 主脉冲的振幅随着载流子浓度增大而减弱. 同时也可看出较弱的内部反射脉冲随着载流子浓度增大从零相位到 π 相位的变换, 并且对于一个特定的载流子浓度 $1.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 探测不到反射, 即反射脉冲消失. 这就是 $\Delta n = n_s - n_a - Z_0 \sigma d$ 作用的结果, 因为特定的载流子浓度值, 使得 $\Delta n = 0$, 界面内部反射被抑制, 反射脉冲消失.

为了深入研究 THz 脉冲与 ZMO 透明导电薄膜的相互作用, 我们研究了薄膜在不同频率的电导率和折射率. ZMO 薄膜的复电导率可通过 THz 穿过参考玻璃基底的时域电场 $E_{\text{glass}}(t)$ 及 ZMO 样品的时域电场 $E_{\text{glass+ZnO}}(t)$ 对比计算获得. 如果导电薄膜的厚度远小于波长和趋肤深度, 时域 THz 主脉冲的 Fourier 变换将得到频域 THz 光谱, 可得^[20, 21]

$$\frac{E_{\text{glass+ZnO}}(\omega)}{E_{\text{glass}}(\omega)} = \frac{1 + n_{\text{glass}}}{1 + n_{\text{glass}} + Z_0 \sigma(\omega) d}, \quad (1)$$

式中 $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$ 为自由空间的阻抗, d 为薄膜厚度. 玻璃基底的折射率 n 几乎与频率无关, 且

从图 4(a) 两条曲线可确定 n 的值为 2.4, 这和其他文献报道的在 0.1—1 THz 频率范围的值非常接近^[22, 23]. 根据测试得到的光谱, ZMO 导电薄膜的复电导率可由(1)式确定. 有一点必须声明, ZnO 薄膜的等离子体频率 (ϵ_p 约为数百太赫兹) 比研究频率范围 (0.1—1.0 THz) 要大得多, 电导率的虚部比相应的实部要小得多. 因此, 下面只讨论电导率实部.

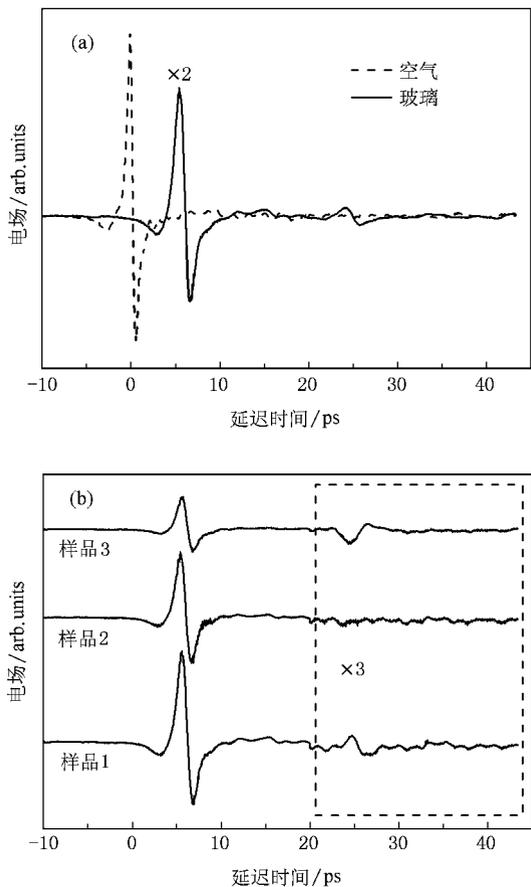


图 4 THz 脉冲在空气和玻璃中的传播与界面反射 (a) 通过空气 (虚线) 和玻璃基底 (实线) 的 THz 脉冲 (b) 三个 ZMO 导电膜样品的 THz 脉冲电场, 3 条曲线垂直排列是为了对比更清楚, 而右侧虚线框是为了强调在界面的内部反射脉冲

表 1 三个 ZMO 薄膜样品的相关物理参数

	$n/10^{20} \text{ cm}^{-3}$	d/nm	$\mu/\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$\frac{\omega_p}{2\pi}/\text{THz}$	$\frac{\gamma}{2\pi}/\text{THz}$
样品 1	0.34 ± 0.09	124 ± 3	29 ± 7	120 ± 31	51 ± 14
样品 2	1.10 ± 0.30	143 ± 3	26 ± 7	212 ± 56	57 ± 14
样品 3	3.10 ± 0.60	200 ± 3	23 ± 4	364 ± 79	69 ± 15

图 5(a) 中离散点显示了三个 ZMO 透明导电薄膜样品在不同频率下的电导率, 数据是根据图 4(b) 中主脉冲由(1)式分析而得. 从图 5(a) 可看出, 低载

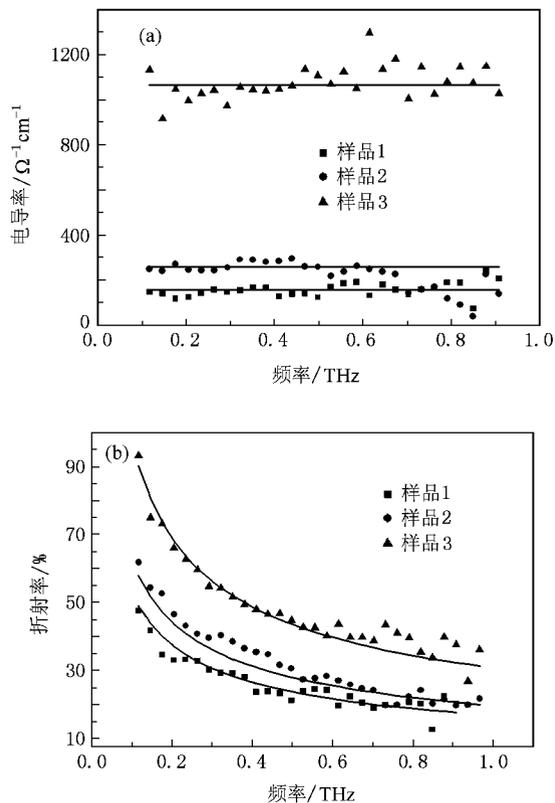


图 5 各种载流子浓度的 ZMO 薄膜电导率和折射率测量值与脉冲频率的函数关系. 实心点为样品测量数据, 实线为以 Drude 模型(2)和(3)式理论模拟结果, 拟合参数取自表 1. (a) 电导率, (b) 折射率

流子浓度显示高阻抗, 相应高载流子浓度为低阻抗, 并且可以看出电导率随频率变化不明显, 几乎与频率无关.

介电函数 $\epsilon(\omega)$ 揭示了 ZMO 薄膜折射率与薄膜电导率的关系, 函数关系式为

$$\begin{aligned} \epsilon(\omega) &= (n(\omega) + ik(\omega))^2 \\ &= \epsilon_d + i\sigma(\omega\epsilon_0), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 n 和 k 分别为薄膜的折射率和消光系数, ϵ_d 为绝缘 ZnO 薄膜的实介电常数. 把测得的电导率 σ 代入(2)式可以计算得到折射率数据, 结果如图 5(b) 中离散点所示. 从图 5(b) 可看出, ZMO 薄膜在 THz 波段的折射率很大, 而且薄膜载流子浓度越高, 折射率越大, 折射率随着 THz 频率增大而减小.

3.3. THz 与自由载流子相互作用的 Drude 模型

THz 与导体或高自由载流子浓度的半导体相互作用过程主要表现为它与自由载流子的相互作用. 在一般情况下, 这一相互作用可以采用经典的 Drude

模型进行处理^[24]. THz 辐射对于物质中自由载流子的性质(包括浓度、有效质量、迁移率等)是非常敏感的. 因此, 可以使用 THz 光谱研究物质, 尤其是半导体样品中载流子的性质, 其中一条重要的性质是物质在不同频率的电导率. 依据这个模型, 复电导率可表示为

$$\alpha(\omega) = \frac{i\epsilon_0\omega_p^2}{\omega + i\gamma}, \quad (3)$$

式中 $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}}$ 为等离子振荡频率, 其中 n 为载流子浓度, m^* 为载流子的有效质量. 对于 ZnO 晶体 $m^* = 0.24m_e$ ^[25], m_e 为自由电子质量. $\gamma = 1/\tau = e/(m^* \mu)$ 是物质中载流子衰减系数, τ , e 和 μ 分别是载流子平均弛豫时间、电子电量和载流子迁移率. 在 Drude 理论中, 描述材料中自由载流子动力学的主要参数是 ω_p 和 γ , 都可由 Hall 效应来表征.

如上所述, 介电函数 $\epsilon(\omega)$ 揭示了半导体薄膜折射率与薄膜电导率的关系, 把测得的电导率 σ 代入(2)式中可以计算得到物质在不同频率的折射率数据, 反之亦然. (2)和(3)式就构成了 Drude 经典模型在 THz 与自由载流子相互作用中应用的理论基础.

下面我们应用 Drude 模型来处理 THz 与 ZMO 半导体透明导电薄膜的相互作用, 说明 THz 与 ZMO 导电薄膜的相互作用可以很好地用 Drude 模型描述. 应用 Drude 理论模型, 依据(2)和(3)式可以计算出电导率和折射率与频率的关系, 如图 4 中实线所示. 从图 4 可以看出, 理论计算的结果和实验结果符合得非常好. 在理论计算中, 使用了介电常数 $\epsilon_d = 7.7$ ^[26], 其他参数如表 1 所列. 根据 Drude 模型, 导电薄膜的电导率和折射率与载流子浓度成正比, 图 6 显示了在 0.5 THz 时薄膜的电导率和折射率与薄膜载流子浓度之间的关系. 从图 6 可以看出, 电导率和折射率都与薄膜载流子浓度保持一种线性关系, 这与 Drude 理论预言相符, 说明 ZMO 透明导电半导体薄膜的载流子可以按照自由载流子进行处理, 这与其他文献^[27, 28]报道相一致.

电导率与频率大小无关的 ZMO 薄膜可作为 THz 脉冲的宽带减反射膜, 而与电导率大小相关的薄膜反射特性使得可以通过调节薄膜的电导率来调节宽带 THz 脉冲的反射. 在此, 我们可以为 ZMO 导电膜定义一个特定的电导率 σ_0 ($\sigma_0 \approx 260 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$). 当 $\sigma = \sigma_0$ 时, ZMO 导电膜相当于宽带 THz 减反射

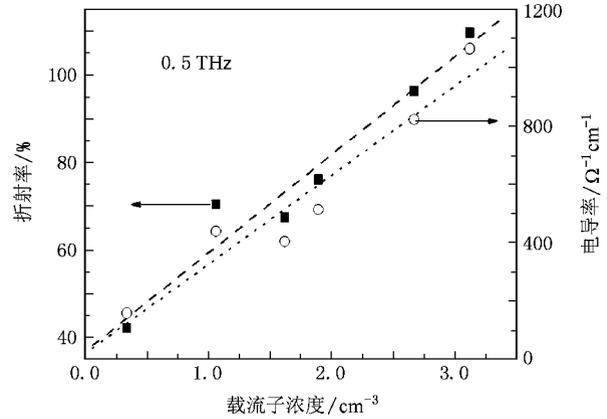


图 6 ZMO 薄膜载流子浓度与折射率和电导率在 0.5 THz 时的关系图. 虚线和点线分别是折射率和电导率的拟合曲线

膜. 此时反射脉冲消失; 当 $\sigma > \sigma_0$ 时, 反射波的相位相对于入射波有 π 相位的变换, 而当 $\sigma < \sigma_0$ 时, 入射波与反射波相位一样. 此处薄膜的电导率由载流子浓度决定, 因此通过调节半导体导电膜的载流子浓度可以改变宽带 THz 的反射性质, 具体到本实验中就是在制备时通过调节反应溅射的 O_2 气分压来调节透明导电膜的载流子浓度, 从而实现 THz 反射性质的调控.

Thoman 等^[20]通过在 Si 基体上镀厚度不同的 Au 膜(10nm 左右)来调节 Au 膜的电导率, 以此实现对 Au 膜 THz 抗反射能力的调制. 这种超薄的岛状不连续 Au 膜不能用简单的 Drude 模型来解释, 同时由于制膜过程本身重复性较差, 因此也不容易获得具有适合抗 THz 反射能力的薄膜. 采用本文方法制备的 ZMO 透明导电薄膜厚度为几百纳米, 薄膜表面连续平整, 光滑致密, 薄膜电导率和折射率遵从 Drude 理论所描述的规律. 由于在制备时能够通过调节 O_2 气分压简单地实现对载流子浓度的改变, 因此在制备工艺上比超薄不连续 Au 膜更容易实现对 THz 抗反射能力的调制.

4. 结 论

通过直流磁控反应溅射镶嵌 Mo 的金属 Zn 靶在普通玻璃基底上制备了 ZMO 透明导电薄膜, 通过调节不同的 O_2 气分压得到不同载流子浓度的透明导电薄膜. 应用 THz 时域光谱技术研究了 THz 透过 ZMO 薄膜的传输特性, 并利用 Fourier 变换得到薄膜的电导率和折射率. 实验结果显示薄膜的电导率几

乎与频率无关, 尽管在所研究波段内薄膜的折射率比玻璃基底的折射率大得多, 但是决定界面内部反射相位性质的是导电膜的电导率而非折射率. 合适的载流子浓度的半导体薄膜可作为宽带 THz 脉冲

抗反射涂层. 应用简单的 Drude 模型分析导电薄膜的电导率和折射率, 结果表明 Drude 理论模型可以很好描述半导体导电薄膜与 THz 的作用.

- [1] Sheats J R 1997 *Science* **277** 191
- [2] Wager J F 2003 *Science* **300** 1245
- [3] Gordon R G 2000 *Mater. Res. Soc. Bull.* **25** 52
- [4] Thestrup B ,Schou J 1999 *Appl. Phys. A* **69** S807
- [5] Minami T 2000 *Mater. Res. Soc. Bull.* **25** 38
- [6] Haug F J ,Geller Z S ,Zogg H ,Tiwari A N 2001 *J. Vac. Sci. Technol. A* **19** 171
- [7] Wang S P ,Shen J ,Zhang Z J ,Yang X L ,Zhang Q 2008 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **28** 1 (in Chinese) [王三坡、沈 杰、章壮健、杨锡良、张 群 2008 真空科学与技术 **28** 1]
- [8] Xiu X W ,Pang Z Y ,Li M S ,Dai Y ,Ye L N ,Han S H 2007 *Appl. Surf. Sci.* **253** 3345
- [9] Jeon T I ,Grishkowsky D 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1106
- [10] Zhang W ,Azad A K ,Grishkowsky D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2841
- [11] Theberge F ,Chateaufneuf M ,Dubois J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 183501
- [12] Sun H Q ,Zhao G Z ,Zhang C L ,Yang G Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 790 (in Chinese) [孙红起、杨国忠、张存林、杨国桢 2008 物理学报 **57** 790]
- [13] Sun B ,Liu J S ,Ling F R ,Wang K J ,Zhu D Q ,Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1745 (in Chinese) [孙 博、刘劲松、凌福日、王可嘉、朱大庆、姚建铨 2009 物理学报 **58** 1745]
- [14] Zhang Y H ,Wang C 2006 *Chin. Phys.* **15** 649
- [15] Meng T H ,Zhang C L ,Zhao G Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3846 (in Chinese) [孟田华、张存林、赵国忠 2008 物理学报 **57** 3846]
- [16] Barnes W L ,Dereux A ,Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [17] Azad A K ,Zhao Y ,Zhang W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **86** 141102
- [18] Hendry E ,Garcia-Vidal F J ,Martin-Moreno L ,Rivas J G ,Bonn M ,Hibbins A P ,Lockyear M J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 123901
- [19] Darmo K J ,Unterrainer K 2007 *Opt. Express* **15** 6552
- [20] Thoman A ,Kern A ,Helm H ,Walther M 2008 *Phys. Rev. B* **77** 195405
- [21] Walther M ,Cooke D G ,Sherstan C ,Hajar M ,Freeman M R ,Hegmann F A 2007 *Phys. Rev. B* **76** 125408
- [22] Naftaly N ,Miles R E 2005 *J. Non-cryst. Solids* **3512** 3341
- [23] Kojima S ,Kitahara H ,Nishizawa S ,Yang Y S ,Takeda M W 2005 *J. Mol. Struct.* **744** 243
- [24] Xu J Z ,Zhang X C 2007 *Terahertz Science and Technology and Applications* (Beijing : Peking University Press) p98—104 (in Chinese) [许景周、张希成 2007 太赫兹科学技术和应用(北京 北京大学出版社)第 98—104 页]
- [25] Baer W S 1967 *Phys. Rev.* **154** 785
- [26] Azad A K ,Han J ,Zhang W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 021103
- [27] Katzenellenbogen N ,Grishkowsky D 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 840
- [28] Jeon T I ,Grishkowsky D 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3032

Terahertz transmission properties of transparent conducting molybdenum-doped ZnO films^{*}

Wu Chen-Guo¹⁾ Shen Jie^{1)†} Li Dong²⁾ Ma Guo-Hong²⁾

¹⁾ *Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China*

²⁾ *Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China*

(Received 2 April 2009 ; revised manuscript received 21 April 2009)

Abstract

With direct current reactive magnetron sputtering method, transparent conducting molybdenum-doped ZnO (ZMO) thin films with different carrier concentration on glass substrate were fabricated by monitoring oxygen partial pressure. The dielectric responses of the ZMO films are characterized with terahertz time-domain spectroscopy. Frequency dependent conductivity, power absorption and refractive index are obtained and the experimental results can be well reproduced with classic Drude model. Our results reveal that, by adjusting the carrier concentration of ZMO film, the conducting ZMO film can serve as broadband antireflection coatings for substrates and optics in terahertz frequency range.

Keywords : terahertz spectroscopy , film conductivity , broadband antireflection , transparent conducting film

PACC : 7865K , 4280X , 8115C

^{*} Project supported by the Research and Development Foundation for Applied Materials of Shanghai, China (Grant No. 07SA13), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10774099), the Program for Professor of a Special Appointment (Eastern Scholar) in Institutions of Higher Education of Shanghai, China (Grant No. S30105) and the Foundation of Priority Academic Discipline of Shanghai, China (Grant No. B113).

[†] Corresponding author. E-mail : shenjie@fudan.edu.cn