

GaAs 表面等离激元偏振子的激励 以及它的偏光依赖性

吴 鼎 祥

(上海科学技术大学物理系, 上海 201800)

摘要 本文讨论 GaAs 表面采用 $\text{CH}_3\text{Br}:\text{He} = 1:99$ 系光加速腐蚀形成全息衍射光栅的方法、
GaAs 表面等离激元偏振子的激励以及它的偏光依赖性。

PACC: 6320, 7136, 8250

1 引言

近来国外在表面等离激元偏振子 (Surface plasmon polariton, 简称 SPP) 的激励、观测、利用 SPP 的特性研究物质表面微状态, 物质表面分子的物理、化学的吸附、薄膜特性的观测, 固体表面数个原子层范围内的信息等等研究工作非常活跃^[1,2]。作者曾对 Ag/n-GaAs 的 SPP 发光光谱进行了测定^[3], 证实当满足光栅耦合条件时, 在 GaAs 表面能够激励 SPP。

本文将讨论采用 CH_3Br 和 He 的混合气体, 在 Nd-YAG 激光作用下, 通过光化学反应在 GaAs 表面无掩模全息衍射光栅的形成, SPP 的激励以及它的偏光依赖性。

2 全息衍射光栅的形成

图 1 是形成无掩模全息衍射光栅的实验装置。我们采用发振在第四高次谐波, 波长 266nm, 激光功率 100—400mW 10Hz 短脉冲 Nd-YAG 激光器。利用半透镜把激光束分成二束干涉平面波, 并使它们具有几乎相等的入射角照射到样品表面。样品采用 [100] 晶向的 n 型 GaAs (掺 Si, $n = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 材料。首先把样品材料切成 $5\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的长方形, 经过一系列常规清洗以后把样品固定在透明的气室中。对于 [100] 晶向的 GaAs 样品, 为了获得较好的腐蚀效果, 即在 [011] 方向具有三角形形状的光栅腐蚀截面, 样品在气室中固定时, 必须注意它的安置方向。至于腐蚀气体, 我们采用 $\text{CH}_3\text{Br}:\text{He} = 1:99$ 的混合气体。由于腐蚀形成的全息光栅周期 d 和二束光的交差角 2θ 有如下关系:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta},$$

λ 为入射光波长, 所以, 我们可以通过改变入射角 θ 的大小, 获得所需要的光栅周期。形

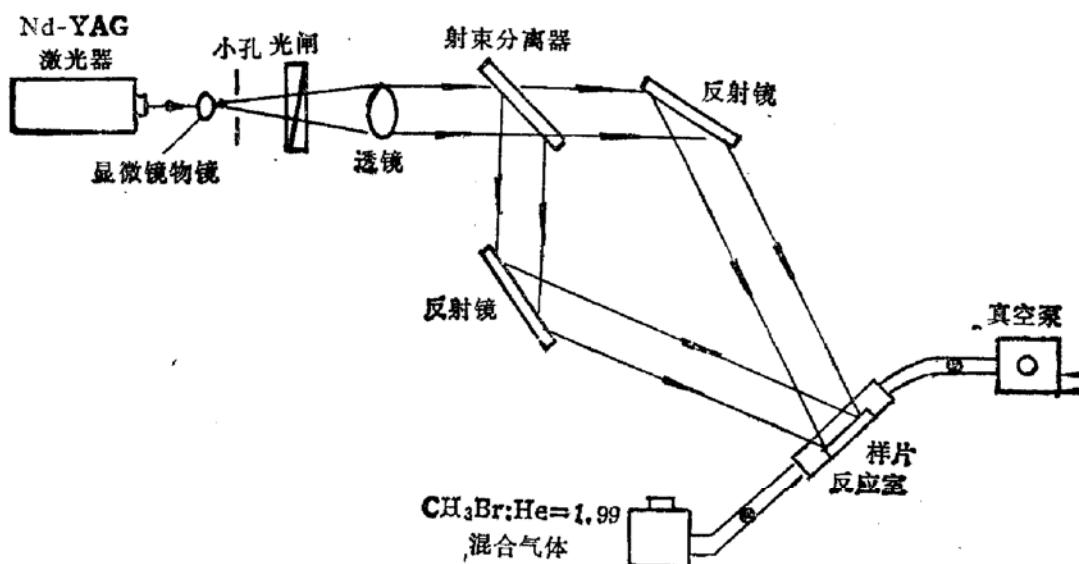
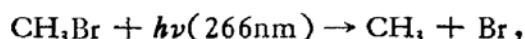


图 1 实验装置

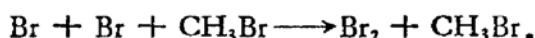
成的全息衍射光栅可以采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察。图 2 (见图版 I) 为 3000 倍 SEM 拍摄的光栅照片, 由于二束激光之间的夹角 $2\theta = 15.2$ 度, 所以, 全息衍射光栅的周期 $d = 1.01\mu\text{m}$ 。图中阴暗部分就是被腐蚀形成的光栅槽的位置。实验中我们分别采用 P 型和 n 型 GaAs 材料, 试图找出它们之间的区别, 实验结果表明, 对二种不同型号的 GaAs 样品, 均能形成全息衍射光栅, 采用 SEM 进行观察尚未发现二者之间有什么明显的区别。

3 光化学反应过程

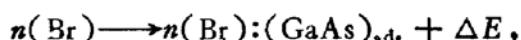
在本实验的光化学反应中, 采用热稳定性比较好的甲基卤是适当的。对 InP、GaAs 等化合物半导体材料, 通常情况下, 甲基卤与它们不起化学反应, 而卤素原子却容易与它们发生作用。对于我们采用的溴化烷 CH_3Br 腐蚀气体, 紫外光的吸收峰在 202nm 附近, 它既保证使大部分激光能量到达 GaAs 表面, 又能使 CH_3Br 吸收部分能量而分解。在 Nd-YAG 激光照射下, 首先发生光化学反应:



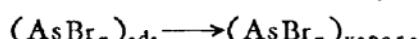
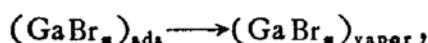
产生的 Br 原子向 GaAs 表面移动过程中, 将发生 Br 原子与 CH_3 , 或 Br 原子与 Br 原子之间的再结合: $\text{Br} + \text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{Br} \rightarrow \text{CH}_3\text{Br} + \text{CH}_3\text{Br}$,



没有发生再结合的 Br 原子, 在 GaAs 表面形成化学吸附:



ΔE 为吸附时产生的热量。最后生成盐类气化, 从而实现了 GaAs 半导体表面的腐蚀。



在上述过程中, 由于 Br 原子的扩展受到激光束的限定, 所以实现了定域微细腐蚀。

4 实验结果与考察

4.1 偏光依赖性

我们在 GaAs 表面采用 CH_3Br 和 He 混合气体, 通过激光加速腐蚀形成全息衍射光栅的实验中发现了一个有趣的现象。我们把形成全息光栅的样品用扫描电子显微镜观察, 发现在全息光栅上出现重叠的波纹(腐蚀条纹)。波纹的走向与入射光的偏光性有关。图 3(见图版 I)给出波纹的走向与偏光的依赖关系。图中的光栅方向均为 y 方向(纵向)。图 3(a) 为 P 偏光形成的全息光栅的 SEM 照片, 光栅周期 $d = 1.27\mu\text{m}$, 波纹的走向与衍射光栅方向平行。图 3(b) 为 S 偏光形成的全息光栅的 SEM 照片, 光栅周期 $d = 1.01\mu\text{m}$, 波纹的走向与衍射光栅垂直。

在 GaAs 表面形成全息衍射光栅的同时, 出现重叠的波纹, 这在光栅截面图中也得到了证实。图 4 为 P 偏光形成的全息衍射光栅截面 SEM 照片, 光栅周期 $d = 1.27\mu\text{m}$, 槽的腐蚀深度 60—70nm。

在全息衍射光栅形成的同时出现重叠的波纹, 它是一种新的发现, 笔者认为, 在激光作用下形成全息衍射光栅的同时, 当满足一定的耦合条件时, 在 GaAs 表面激励起表面等离激元偏振子, 即 SPP。通常情况下它是随机的、杂乱无章的、无规则的(这里对腐蚀波纹而言)。由于入射光是偏振光, 被激励起来的 SPP 被调制到偏光方向, 以波长 $2\pi/K$, 传播, 波纹的出现就是 SPP 在传播过程中的干涉形成的驻波。

4.2 SPP 的色散关系和衰减系数

GaAs 表面激励的 SPP 的色散关系可以采用下式表示:

$$-\frac{\tilde{\varepsilon}_m}{\delta} = \frac{\varepsilon_D}{\beta}, \quad (1)$$

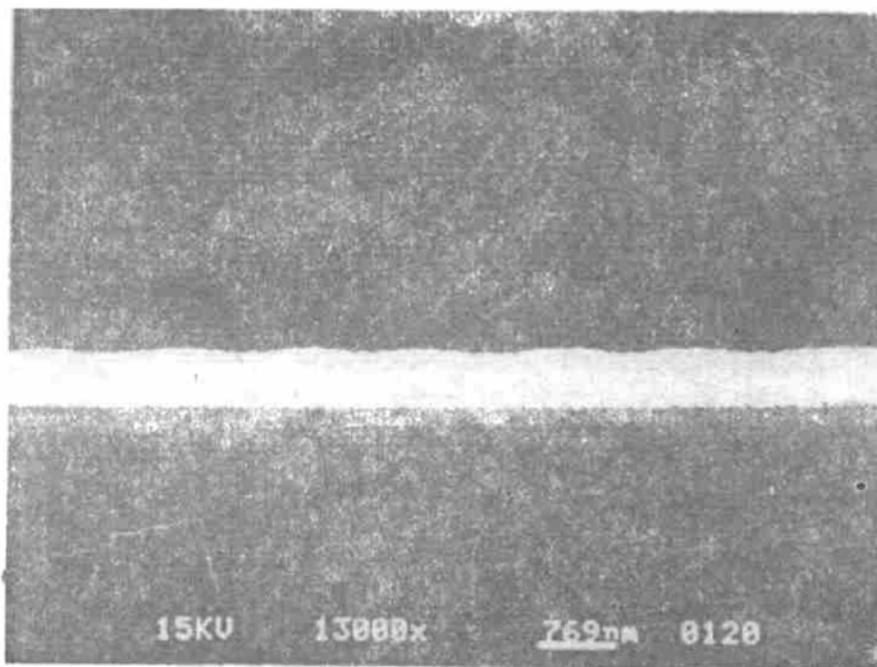


图 4 衍射光栅截面 SEM 照片

$\tilde{\epsilon}_m$: 依赖于频率 ω 的复介电常数, $\tilde{\epsilon}_D$: GaAs 界面电介质的介电常数。在 $\omega\tau \gg 1$ 时,

$$\tilde{\epsilon}_m = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 + i \frac{1}{\omega\tau} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2, \quad (2)$$

其中:

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi Ne^2}{m_e}\right)^{1/2} \text{ 为振荡频率,}$$

$$\tilde{\delta} = \left(\tilde{K}^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \tilde{\epsilon}_m\right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\tilde{\beta} = \left(\tilde{K}^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_D\right)^{1/2}. \quad (4)$$

(3)、(4)式中的 K 为平行于界面的 SPP 的波矢。由此可得

$$\tilde{K}^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \cdot \frac{\tilde{\epsilon}_m \epsilon_D}{\tilde{\epsilon}_m + \epsilon_D} \quad (5)$$

在本实验中, 因为采用 CH_3Br 气体, 所以 $\epsilon_D = 1$ 。我们令: $\tilde{K} = K_r + iK_i$, K_r 为 SPP 的波数, K_i 为衰减系数, 由此可以解得:

$$K_r = \left(\frac{\omega}{c}\right) \left[\frac{a + (a^2 + b^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$K_i = \left(\frac{\omega}{c}\right) \left[\frac{-a + (a^2 + b^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2}. \quad (7)$$

式中: $a = 1 - \frac{1 + \epsilon_1}{(1 + \epsilon_1)^2 + \epsilon_2^2}$, $b = \frac{\epsilon_2}{(1 + \epsilon_1)^2 + \epsilon_2^2}$,

$$\epsilon_1 = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2, \quad \epsilon_2 = \frac{1}{\omega c} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2.$$

(6)式可以写成如下形式: $K_r = \left(\frac{\omega}{c}\right) [f(\omega N)]^{1/2}$. (8)

图 5 表示计算得到的对应于不同的 GaAs 表面电子密度 N 时的 SPP 的色散关系。图中直线 $\omega = cK$ 为真空中的传播关系。

对于 Nd-YAG 激光的第四高次谐波波长 $\lambda = 266\text{nm}$, $\omega = 7.09 \times 10^{15}\text{rad/s}$, 根据图 3(a)、(b) 的实验结果测得 SPP 的波长 λ_{SPP} 分别为 150nm (P 偏光)和 170nm (S 偏光), 由 $K_r = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{SPP}}}$ 得 P 偏光时 $K_r = 4.2 \times 10^5\text{cm}^{-1}$, S 偏光时 $K_r = 3.7 \times 10^5\text{cm}^{-1}$ (如图 5 中▲●所示)。由此得到 GaAs 表面电子密度约 $4 \times 10^{22}\text{cm}^{-3}$ 。GaAs 半导体表面电子密度应该不随激光的偏光方向而变化, 测量值与计算值的差异是由于激光功率的微小差别所造成。

图 6 表示 SPP 的频率与衰减系数之间的关系。当 $\omega = 7.09 \times 10^{15}\text{rad/s}$ 时, $K_i = 6 \times 10^3\text{cm}^{-1}$ 根据波动方程, 表示衰减的 $\exp(-K_i x)$ 中, 因为 $K_i x \ll 1$, 所以在 GaAs 表面激励起来的 SPP 传播距离约 $1.6\mu\text{m}$ 。

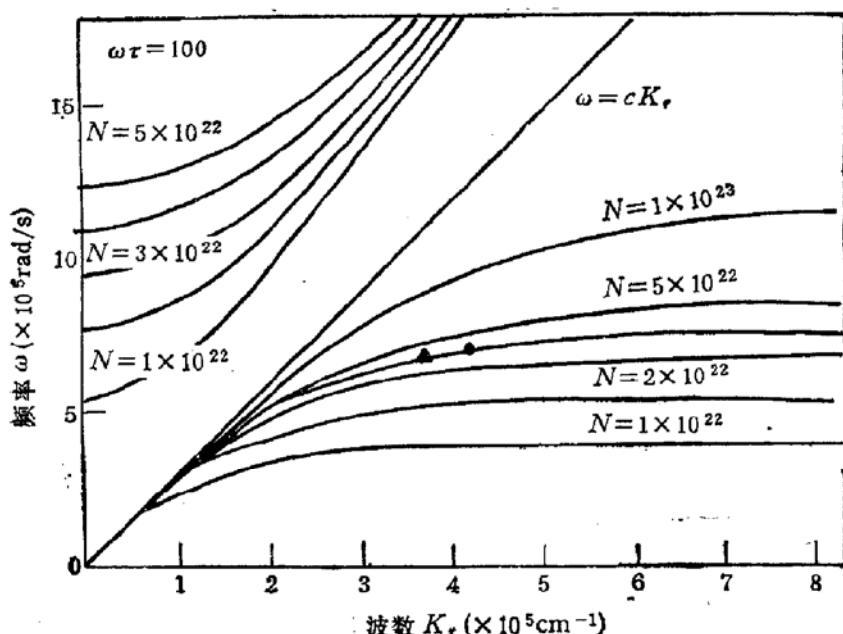


图 5 SPP 的色散关系

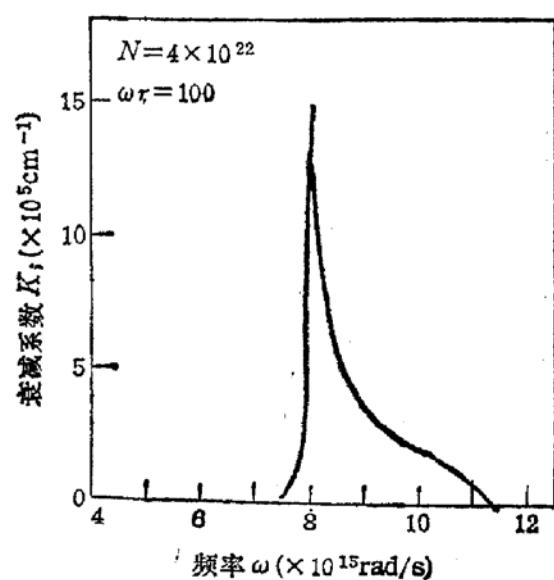


图 6 SPP 的衰减系数

5 结束语

采用 $\text{CH}_3\text{Br}:\text{He} = 1:99$ 混合气体和 Nd-YAG 激光无掩模加速腐蚀方法, 在 GaAs 半导体表面能有效地制备微细全息衍射光栅。在此光栅形成过程中, 我们观察到了 GaAs 表面激励的 SPP, 讨论了 SPP 的传播方向与激光的偏光方向之间的相互关系, 同时给出了对应于不同的 GaAs 表面电子密度时的 SPP 的色散曲线。

参 考 文 献

- [1] B. Rothenhäusler and W. Knoll, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51:783.
- [2] B. Rothenhäusler and W. Knoll, *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 52:1554.
- [3] 吴鼎祥, 物理学报, 1992, 41(2): 282—287.

GaAs Surface Plasmon Polariton Excitation and Its Polarization Dependent Effects

Wu Dingxiang

(Department of Physics, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

Abstract The method to produce holographic diffraction gratings by $\text{CH}_3\text{Br}:\text{He} = 1:99$ photo-accelerated etching on the surface of GaAs and GaAs surface plasmon polariton excitation as well as its polarization dependent effects are discussed.

PACC: 6320, 7136, 8250.