

微小尺寸立方氮化硼线性电光系数的测量*

窦庆萍^{①②} 马海涛^① 贾 刚^{①**} 陈占国^① 张铁臣^③

(① 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学试验区, 长春 130023;

② 牡丹江师范学院, 牡丹江 157012; ③ 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 长春 130012)

摘要 对实验合成的微小尺寸立方氮化硼(cBN)进行横向电光调制, 根据样品的实际情况, 建立了相应的理论和实验方法. 在实验中观测到cBN晶体的线性电光效应, 并且测得了样品的半波电压, 由此进一步计算出立方氮化硼的线性电光系数, 其值为 1.17×10^{-14} m/V.

关键词 cBN 晶体 线性电光效应 半波电压 线性电光系数

自然界中没有天然的立方氮化硼(cBN)晶体. 1957 年Wentorf首次成功合成了具有闪锌矿结构的立方氮化硼, 并命名为Borazon^[1]. cBN是宽禁带半导体, 禁带宽度大约为 6.3 eV, 通过掺杂既可形成N型也可形成P型的半导体材料^[2]. cBN的硬度仅次于金刚石, 而它的抗高温性、抗氧化性、化学稳定性以及半导体特性都优于金刚石^[3]. cBN在整个可见光和红外范围与紫外很大范围内都透明. 因此在光电子学与微电子学等许多领域有广阔的应用前景.

cBN晶体能够产生线性电光效应, 即Pockels效应. 目前我们未见有关的研究报道. 因为cBN的合成条件苛刻, 合成的单晶很小, 最大尺寸也只有 3 mm^[4]. 我们应用自己建立的对微小尺寸cBN样品的测试理论和实验方法, 用自己合成的cBN晶片(尺寸约为 0.3 mm×0.3 mm×0.1 mm)进行横向电光调制, 观测到cBN的线性电光效应, 测出了样品的半波电压, 并由此计算出cBN的线性电光系数.

1 测量原理

由于cBN具有 $\bar{4}3m$ 对称性, 所以在立方晶系的主轴坐标系中, cBN的线性电光系数形式为^[5]

2004-06-14 收稿, 2004-12-09 修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 60176009, 69976013, 69676025)和吉林省科学技术厅(合同号: 20010580)资助项目

** 联系人. E-mail: jiagang@jlu.edu.cn

$$[\gamma] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{41} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

在 cBN 晶体上加电场, 如果外加电场 E 垂直于(111)面, 则在外电场作用下, cBN 由各向同性晶体变为单轴晶体, 产生电致双折射, 光轴方向 z 就是外加电场的方向, 即[111]方向, 相应的 3 个主轴折射率分别为

$$\begin{aligned} n_x = n_y &= n + \frac{\sqrt{3}}{6} n^3 \gamma E, \\ n_z &= n - \frac{\sqrt{3}}{3} n^3 \gamma E, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\gamma = \gamma_{41}$, $n = 2.117$ 为 cBN 晶体的折射率^[6]. 当光波沿垂直于 z 的方向(例如 x 方向)传播时, 电光延迟(振动方向为 y 和 z 的二光波分量的相对相移) δ 为

$$\delta = \frac{\sqrt{3}}{\lambda} \pi \frac{L}{d} n^3 \gamma V, \quad (3)$$

式中, L 为晶体沿光传播方向的长度, d 为晶体沿外加电场方向的厚度, V 为外加直流电压或低频交流电压. 半波电压 V_π , 即 $\delta = \pi$ 时所对应的外加电压值. 从(3)式可得

$$V_\pi = \frac{\sqrt{3} \lambda}{3 n^3 \gamma} \frac{d}{L}. \quad (4)$$

为了测量 cBN 晶体的半波电压 V_π , 采用了横向电光调制结构. 若晶体是长方体, 在[111]方向上施加电压, 并把电光晶体置于两个正交的偏振器之间, 检偏器的偏振方向和空间竖直方向成 45° 角, 同时在两个偏振器之间插入一个 $1/4$ 波片, 其快慢轴与检偏器的偏振方向成 $\pm 45^\circ$ 角. 实验装置如图 1 所示. 在小信号调制下, 即 $V \ll V_\pi$, 电光调制器的输出光强 I 为^[7]

$$I = \frac{1}{2} I_0 + \frac{1}{2} I_0 \frac{\pi}{V_\pi} V, \quad (5)$$

令 $I_1 = \frac{1}{2} I_0$, $I_2 = \frac{1}{2} I_0 \frac{\pi}{V_\pi} V$, 其中 I_0 为入射光的光强.

如果测得 I_1 和 I_2 , 通过 I_1/I_2 , 便可得出 $V_\pi = \pi V \frac{I_1}{I_2}$, 在 V 已知的情况下, 便可求出 V_π . 这里用到的是 I_1/I_2 , 所以只需测得与 I_1 和 I_2 成比例的物理量即可, 不必

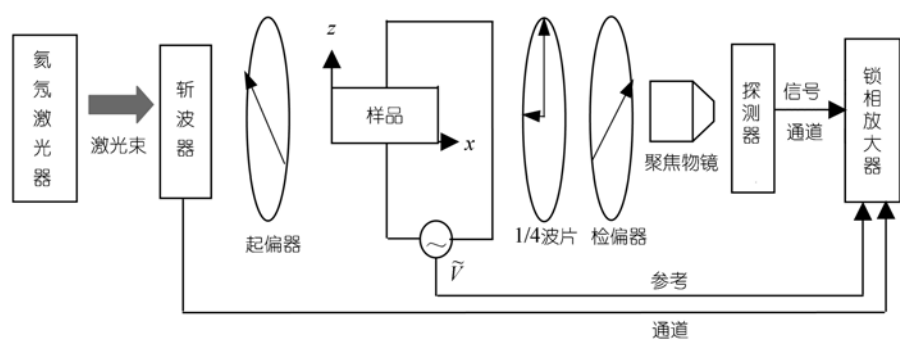


图 1 实验装置图

测量 I_1 和 I_2 的绝对值, 这给实验带来了很大方便, 并使测量的精度提高。

理想的 cBN 晶体是正八面体结构, 但所合成的大都为发育不完全的正八面体, 裸露在外的面都是 $\{111\}$ 面。上下为两个大面, 侧面为不规则的小面, 且侧面与上下底面不垂直。合成的 cBN 的实际形状如图 2 所示。左上角的 cBN 样品, 相对的两个面彼此平行且近似全等, 比较适合于测量, 实验中所用的即为此种形状的 cBN 晶体。为了保证在 cBN 内部光的传播方向与 z 方向垂直, 满足(5)式所需条件, 必须做相应的修正。在实验中应使 cBN 的上下底面(即大面)相对水平面偏转一个角度 $\Delta\theta$ 。cBN 的 xoz 面的剖面图如图 3 所示。

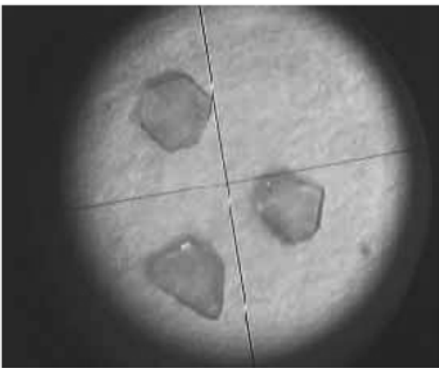


图 2 通过显微镜拍摄的 cBN 样品照片

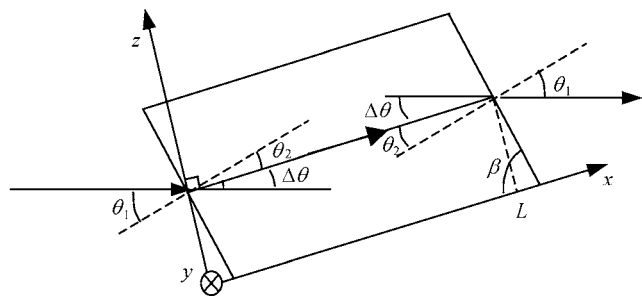


图 3 cBN 的 xoz 面的剖面图
 x 沿 $[\bar{1}\bar{1}2]$ 方向, y 沿 $[1\bar{1}0]$ 方向, z 沿 $[111]$ 方向

由立方氮化硼的结构, 根据几何关系得

$$\sin \beta = \cos \theta_2 = \frac{2\sqrt{2}}{3}, \quad (6)$$

并根据折射定律可以计算出

$$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 = 25.4^\circ. \quad (7)$$

如图 1, cBN 晶体若是长方体, 起偏器的偏振方向与空间竖直方向成 45° 角即可保证电光调制器的工作点最佳, 也就是线性度最好, 灵敏度最高. 但是 cBN 的实际形状如图 2 和 3 所示, 光通过 cBN 后, 由于折射, 出射光的偏振方向相对于入射光的偏振方向发生改变. 通过理论计算, 出射光的偏振方向与空间竖直方向成 39.2° 角, 电光调制器的工作点将偏离最佳工作点, 信号将变弱并且失真. 为了解决这一问题, 需进一步修正.

在 $x = 0$ 处, 由 Fresnel 公式得

$$\begin{aligned} E_{cy}(0_+) &= \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} E_{\perp}(0_-), \\ E_{cz}(0_+) &= \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} E_{\parallel}(0_-), \end{aligned} \quad (8)$$

其中, E_{cy} 和 E_{cz} 分别表示 cBN 内电矢量在 y 和 z 方向上的分量, $E_{\perp}$ 和 $E_{\parallel}$ 分别表示 cBN 外垂直于入射平面和平行于入射平面的分量. 0_- 表示在 $x = 0$ 处的入射光的电矢量分量, 0_+ 表示在 $x = 0$ 处的出射光的电矢量分量.

在 $x = L$ 处, 同样由 Fresnel 公式得

$$\begin{aligned} E_{\perp}(L_+) &= \frac{2 \cos \theta_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} E_{cy}(L_-), \\ E_{\parallel}(L_+) &= \frac{2 \cos \theta_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_2 - \theta_1)} E_{cz}(L_-), \end{aligned} \quad (9)$$

L_- 表示在 $x = L$ 处入射光的电矢量分量, L_+ 表示在 $x = L$ 处出射光的电矢量分量. 在施加交流信号前可以认为

$$\begin{aligned} E_{cy}(L_-) &= E_{cy}(0_+), \\ E_{cz}(L_-) &= E_{cz}(0_+). \end{aligned} \quad (10)$$

在此情况下, 为了保证电光调制器的工作点最佳, 必须在施加交流调制信号前使 $E_{\perp}(L_+)$ 和 $E_{\parallel}(L_+)$ 相等, 而此时 $E_{\perp}(0_-)$ 和 $E_{\parallel}(0_-)$ 不再相等, 应表示为

$$\begin{aligned} E_{\perp}(0_-) &= E \sin \alpha, \\ E_{\parallel}(0_-) &= E \cos \alpha, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, E 为起偏器输出光的电矢量的大小, α 是起偏器的偏振方向与空间竖直方向所成的角度.

将(11)式代入(8)式后, 再将(8)式代入(9)式, 由 $E_{\perp}(L_+) = E_{\parallel}(L_+)$ 有

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\cos^2(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (12)$$

由此可得

$$\alpha \approx 50.8^\circ. \quad (13)$$

经过修正, cBN 样品上下底面即(111)面相对于空间水平方向的偏转 25.4° 角, 起偏器的偏振方向与空间竖直方向所成的角度为 50.8° .

2 测试实验

由于样品的尺寸较小, 而入射光束的直径明显大于样品尺寸, 为限制未通过 cBN 晶体的无用光被探测器接收, 采用了图 4 的样品结构来提高测量的准确度. 将 cBN 晶体放在两块导电玻璃(ITO)中间, 用绝缘胶把导电玻璃粘在一起, 并把导电玻璃作为 cBN 的两个电极. 在显微镜下, 将 cBN 周围固定上不透光的物质, 使得只有经过 cBN 的光才能从两块导电玻璃之间的夹缝射出.

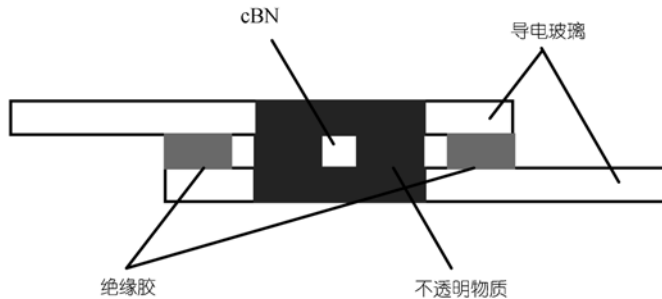


图4 测试样品结构图

在实验中使用的是波长为 632.8 nm 的氦-氖激光器, 斩波器的频率为 140 Hz , 起偏器与空间竖直方向的夹角为 50.8° , 样品的上下底面(即(111)面)与空间水平面成 25.4° 角. 实验中所用的是硅探测器, 它的光生开路电压较小时, 输入光强与开路电压之间近似成线性关系^[8].

首先cBN的[111]方向上未加调制电压 $\tilde{V} = V_m \sin \omega_m t$ 时, 开启斩波器对入射光进行调制, 同时为锁相放大器提供参考信号, 横向电光调制器输出的光被光电探测器接收后送到锁相放大器的信号输入端, 测得的光电压记做 U_1 . 因为考虑到锁相放大器检测的是斩波得到的方波展开成谐波后的基频波, 所以加上一个修正因子 $\frac{2}{\pi}$.

$$U_1 = \frac{2}{\pi} M I_1 = \frac{2}{\pi} M \frac{1}{2} I_0 = 0.439 \text{ mV}, \quad (14)$$

其中, M 是与光路系统、光电探测器响应度和锁相放大器等电子学系统有关的常数.

然后去掉斩波器, 用信号发生器在 cBN 晶体的 [111] 方向上施加调制电压 $\tilde{V} = V_m \sin \omega_m t$, 同时从信号发生器引出一个信号为锁相放大器提供参考信号. 此时测得的探测器输出电压 U_2 为

$$U_2 = MI_2 = M \frac{1}{2} I_0 \frac{\pi}{V_\pi} V_m, \quad (15)$$

改变 V_m 值, 测得 U_2 与 V_m 的关系曲线如图 5 所示.

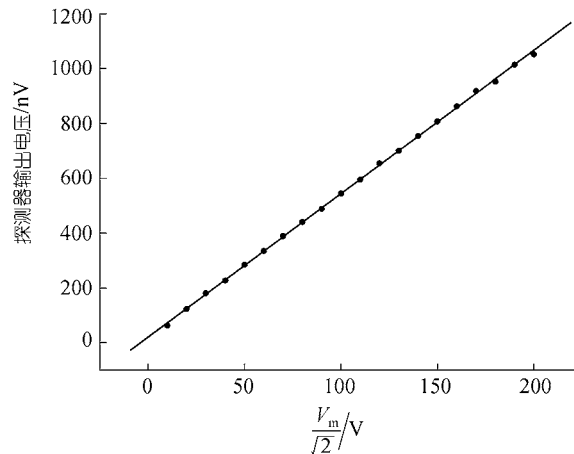


图 5 U_2 与 V_m 的关系曲线

从图像可以看出 U_2 与 V_m 成线性关系, 满足小信号调制条件, 并由曲线斜率得到

$$\frac{M\pi I_0 \sqrt{2}}{2V_\pi} = 5.83 \times 10^{-9}. \quad (16)$$

利用(14)和(16)式可以得到半波电压

$$V_\pi = 5.25 \times 10^5 \text{ V}. \quad (17)$$

使用读数显微镜测得 cBN 的长度 L 和厚度 d 的数值分别为

$$L = 0.401 \text{ mm}, d = 0.064 \text{ mm}. \quad (18)$$

利用(4)式可得到 cBN 的电光系数

$$\gamma_{41} = 1.17 \times 10^{-14} \text{ m/V}. \quad (19)$$

3 结论

在 cBN 晶体的 [111] 方向上外加电场后存在线性电光效应, 我们在实验上测

量了这一效应, 并测得输出光强与调制电压成线性关系的函数图像. 从所测数据计算出了 cBN 的半波电压和线性电光系数.

在以往的电光效应测量中, 大都需要测量绝对光强值^[9], 根据测得的光强来计算半波电压和线性电光系数, 但在实验上测量绝对光强往往是很困难的, 而在我们的实验中只需要测量两个电压值 U_1 和 U_2 , 这给实验带来了很大的方便. 因为样品很小, 半波电压很高, 如果用直接测量方法^[9], 在未达到半波电压时样品就被击穿了, 实验根本无法进行. 如果用消光法^[9], 因为信号太弱, 也无法实现.

参 考 文 献

- 1 Wentorf R F Jr. Cubic form of boron nitride. J Chem Phys, 1957, 26: 956
- 2 Taniguchi T, Watanabe K, Koizumi S, et al. Ultraviolet light emission from self-organized *p-n* domains in cubic boron nitride bulk single crystals grown under high pressure. Applied Physics Letters, 2002, 81(22): 4145~4147[DOI]
- 3 赵永年, 邹广田, 王 波, 等. 氮化硼薄膜内应力的红外光谱研究. 高等学校化学学报, 1998, 19(7): 1136~1139
- 4 Taniguchi T, Teraji T, Koizumi S, et al. Appearance of *n*-type semiconducting properties of cBN single crystals grown at high pressure. Jpn J Appl Phys, 2002, 41: 109~111[DOI]
- 5 石顺祥, 陈国夫, 赵 卫, 等. 非线性光学. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. 119~120
- 6 张铁臣, 邹广田. 立方氮化硼. 长春: 吉林大学出版社, 1993. 17
- 7 亚里夫, A. 光电子学导论. 北京: 科学出版社, 1983. 267~272
- 8 卢春生. 光电探测技术及应用. 北京: 机械工业出版社, 1992. 66
- 9 Aillerie M, Thévenaz N, Fontana M D. Measurement of the electro-optic coefficients: description and comparison of the experimental techniques. Appl Phys, 2000, B 70: 317~334[DOI]