文章编号：1000-5773(2008)03-0309-04

金刚石基底上氮化硼薄膜的场发射特性研究*

刘立华[1,2]，李英爱[1]，顾广瑞[3]，赵永年[1]

(1. 吉林大学超硬材料国家重点实验室，吉林长春 130012；
2. 吉林师范大学物理学院，吉林四平 136000；
3. 延边大学理工学院物理系，吉林延吉 133002)

摘要：利用射频磁控溅射方法，在金刚石膜上沉积了氮化硼薄膜。红外光谱分析表明，氮化硼薄膜的结构为六角氮化硼。在超高真空系统中测量了样品的场发射特性，沉积在金刚石膜上的氮化硼薄膜的阈值电场为 12 V/μm，最大发射电流密度为 272 μA/cm^2。并且沉积在金刚石膜上的氮化硼薄膜的场发射特性明显优于金刚石薄膜本身的场发射特性。这说明，氮化硼薄膜可以有效地改善金刚石膜的场发射特性。场发射 Fowler-Nordheim(F-N)曲线表明，电子发射是通过遂穿表面势垒完成的。

关键词：氮化硼薄膜；场发射特性；磁控溅射

中图分类号：O521.2；TN873.95 **文献标识码**：A

1 引 言

冷阴极是平板显示器和真空微电子设备的重要组成部分。人们对场发射特性的研究多数致力于具有低阈值电场、高发射电流密度的阴极材料。近年来，宽禁带半导体金刚石、类金刚石薄膜成为场发射研究的热点[1-2]。这是因为这些材料具有高热导率、高化学稳定性、抗离子轰击性和负电子亲和势。氮化硼不仅具有类似于金刚石的优良特性，而且能够形成均匀、平坦的氮化硼薄膜，并且氮化硼薄膜的禁带宽度大，具有负的电子亲和势表面，可获得有效的电子发射，因此对氮化硼薄膜场发射的研究引起了人们的重视。Sugino 等人以石墨纳米纤维为基底沉积了氮化硼薄膜，发现氮化硼薄膜可以有效地改善石墨纳米纤维的场发射特性[3]。含有立方氮化硼晶粒的氮化硼薄膜场发射特性优于不含立方氮化硼晶粒的氮化硼膜[4]。氮化硼薄膜的厚度对其场发射特性也有一定影响，研究表明，在一定范围内随厚度的减小发射性能有变好的趋势[5]。

本工作利用射频磁控溅射方法，以金刚石膜为基底沉积了氮化硼薄膜，并对其场发射特性进行了分析。

2 实 验

金刚石薄膜的制备：金刚石膜是利用热灯丝辅助等离子化学气相沉积方法在 Si 上沉积的。图 1 为金刚石膜的 Raman 光谱，大约在 1 332 cm^{-1}处尖锐的谱峰为金刚石的特征峰。图 2 为金刚石膜的扫描电子显微镜(SEM)照片，可以看出金刚石膜质量良好、取向有序，表面呈尖状凸起。

BN 薄膜的制备：在真空室中，通入 90%的高纯 Ar(99.99%)和 10%的高纯 N_2(99.99%)的混合气体，在金刚石基底上沉积 1 h，制备出了 BN 薄膜。真空室被预抽真空，真空度低于 0.5 mPa；射频(Radio Frequency，rf)功率为 200 W；靶与基底的距离约为 5 cm；薄膜沉积时基底偏压为 −140 V，基底温度为

* **收稿日期**：2007-09-21；**修回日期**：2007-11-25
作者简介：刘立华(1974—)，女，副教授，主要从事超硬薄膜和功能薄膜的研究. E-mail：liulh66@sina.com
通讯作者：李英爱(1966—)，女，高级工程师，主要从事超硬薄膜和功能薄膜的研究. E-mail：liya@jlu.edu.cn

500 ℃;工作气体总压力为2 Pa。

利用红外光谱表征了氮化硼薄膜的结构,红外谱在 Bruker IFS-66 型傅立叶变换红外谱仪上进行。在超高真空(<0.5 μPa)的情况下测量了样品的场致电子发射特性,样品作为阴极,导电玻璃板为阳极,间距为 100 μm,由两根玻璃丝隔开,样品面积为 5 mm×5 mm。

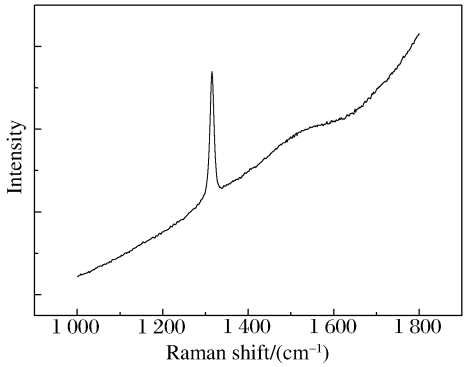


图 1 金刚石薄膜的 Raman 光谱

Fig. 1 Raman spectrum of the diamond film

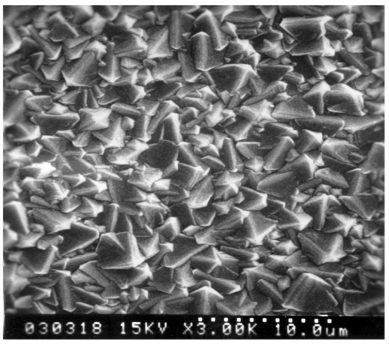


图 2 金刚石薄膜的 SEM 照片

Fig. 2 Scanning electron microscope(SEM) image of the diamond film

3 结果与讨论

图 3 为在上述条件下制备的氮化硼薄膜的红外光谱。由图中可以看出,样品有两个红外特征峰,1 380 cm^{-1}处的特征峰对应于六角平面内 B—N 伸长振动模式,780 cm^{-1}处的特征峰对应于六角平面间 B—N—B 的变形振动模式。这表明制备的样品为六角氮化硼结构。

利用电流密度-电场强度(J-E)关系曲线对样品的场发射特性进行了分析。当场发射电流密度为 10 μA/cm^2 时,阳极和样品之间所加的电压定义为阈值电压,对应的电场为阈值电场。图 4 为金刚石膜基底上氮化硼薄膜的场发射 J-E 曲线。样品的阈值电场和最大发射电流密度列于表 1。由表 1 可知,沉积在金刚石表面上的 BN 薄膜场发射特性明显好于金刚石膜本身的场发射特性,阈值电场为 12 V/μm,当电场升高到 28 V/μm 时,最大发射电流密度为 272 μA/cm^2;而金刚石膜的阈值电场为 18 V/μm,当电场为 36 V/μm 时,最大发射电流密度为 160 μA/cm^2。

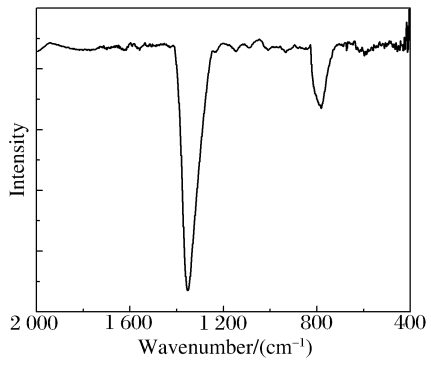


图 3 氮化硼薄膜的红外光谱

Fig. 3 Fourier transform infrared spectroscopy of BN thin film on Si substrate

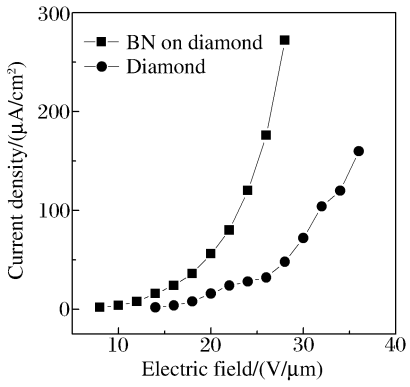


图 4 样品的场发射特性曲线

Fig. 4 Field emission characteristics of the samples

表 1　样品的阈值电场和最大发射电流密度

Table 1　Threshold electric field and the highest emission current density of the sample

Samples	Threshold electric field/(V/μm)	The highest emission current density/(μA/cm²)
Diamond film	18	160
BN coated diamond film	12	272

通常采用 Fowler-Nordheim(F-N)理论分析场发射结果。F-N 理论由下式给出

$$\ln\left(\frac{J}{E^2}\right)=\ln\left(\frac{A\beta^2}{\Phi}\right)-\frac{B\Phi^{3/2}}{\beta}\cdot\frac{1}{E}$$

式中:J 为电流密度,E 为两极间的电场强度,Φ 为功函数,β 为场增强因子,$A=1.54\ \mu A\cdot eV\cdot V^{-2}$,$B=68.3\ MV\cdot eV^{-3/2}\cdot cm^{-1}$。图 5 为样品的场发射 F-N 曲线,由图可知,金刚石薄膜的 F-N 曲线近似为一条直线,表明电子发射是通过隧穿表面势垒完成的。沉积在金刚石膜上的 BN 薄膜的 F-N 曲线分成两段:在高电场区域,F-N 曲线斜率较陡峭;在低电场区域,F-N 曲线斜率较平缓。对于同一样品来说,F-N 曲线斜率的变化可能归因于不同发射区域的场增强因子 β 不同[4],场增强因子 β 的改变量可由两段直线的斜率比得出

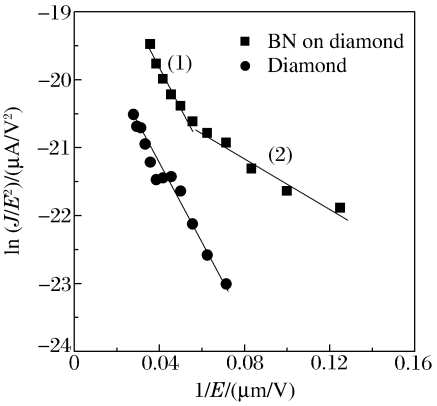


图 5　样品的场发射 F-N 曲线

Fig. 5　F-N plots of the samples

$$k_1/k_2=(\beta_1/\beta_2)^{-1}\approx 3.2$$

由上式可知,在低电场区场增强因子增加了 3.2 倍。

氮化硼薄膜的场发射特性一般用跳跃导带模型解释[6]:BN 多晶薄膜内部由于生长过程中形成的缺陷及晶粒间界在禁带中引入能级准连续分布的局域电子态;电子有可能是通过隧穿费米能级附近的定域态,即产生跳跃电导,从而到达薄膜表面的。由于 BN 薄膜带隙很宽(≥6 eV),在其表面电子亲和势很小,甚至为负值,因而薄膜表面的电子很容易隧穿表面势垒逸入真空。金刚石膜基底上氮化硼膜的场发射特性好于金刚石膜本身,这可能是由于在氮化硼薄膜表面处,费米能级与真空能级之间的势垒高度小于金刚石膜表面处的势垒高度。

4　结　论

研究了金刚石膜基底上 BN 薄膜的场发射特性。其阈值电场为 12 V/μm,最大发射电流为密度为 272 μA/cm²。而金刚石膜的阈值电场为 18 V/μm,最大发射电流密度为 160 μA/cm²。沉积在金刚石膜上的 BN 薄膜的场发射特性优于金刚石薄膜的场发射特性。这说明,氮化硼薄膜可以有效地改善金刚石膜的场发射特性。

References:

[1] Xu N S,Chen Y,Deng S Z,et al. A New Mechanism Responsible for the Enhancement of Local Electric Field on the Surface of Emitting Carbon Nanotubes [J]. Chin Phys Lett,2001,18:1278-1281.

[2] Wang W L,Liao K J,Hu C G,et al. Field Emission from Nanostructured Carbon Films on Si Tips [J]. Chin Phys Lett,2001,18:1132-1134.

[3] Chiharu Kimura,Tomohide Yamamoto,Shingo Funakawa. Electron Field Emission from Boron Nitride Nanofilm and Its Application to Graphite Nanofiber [J]. J Vac Sci Technol B,2003,21(5):2212-2216.

[4] Chiharu Kimura,Tomohide Yamamoto,Takashi Sugino. Field Emission Characteristics of Boron Nitride Films Deposited on Si Substrates with Cubic Boron Nitride Crystal Grains [J]. J Vac Sci Technol B,2001,19(3):1051-

1054.

[5] Gu G R, Li Y A, Zhao Y N, et al. Influence of Thickness on Field Emission Characteristics of Nanometer Boron Nitride Thin Films [J]. Chin Phys Lett, 2003, 20(6): 947-949.

[6] Chiharu Kimura, Tomohide Yamamoto, Takashi Sugino. Improved Field Emission Characteristics of GaN by BN Coating [J]. J Vac Sci Technol B, 2003, 21(1): 544-547.

Field Emission Characteristics of Boron Nitride Film Deposited on Dimond Film Substrate

LIU Li-Hua[1,2], LI Ying-Ai[1], GU Guang-Rui[3], ZHAO Yong-Nian[1]

(1. *National Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun* 130012, *China*;
2. *College of Physics, Jilin Normal University, Siping* 136000, *China*;
3. *College of Science and Engineering, Yanbian University, Yanji* 133002, *China*)

Abstract: Boron nitride(BN) thin film on diamond film substrate was synthesized by radio frequency (rf) magnetic sputtering physical vapor deposition. The field emission characteristics of diamond film and BN coated diamond film were measured in an ultrahigh vacuum system. Experiments demonstrate that BN film is effective in improving the field emission characteristics of diamond film. The threshold electric field is 12 V/μm and highest emission current density is 272 μA/cm^2 for the BN coated diamond film. The Fowler-Nordheim plots show that electron emission is due to tunneling over a barrier.

Key words: boron nitride films; field emission characteristics; rf magnetic sputtering