

# 金刚石半导体研究进展\*

熊礼威<sup>1,2</sup>,汪建华<sup>1,2</sup>,满卫东<sup>2</sup>,刘长林<sup>2</sup>,翁俊<sup>2</sup>

(1 中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031;2 武汉工程大学湖北省等离子体化学与新材料重点实验室,武汉 430073)

**摘要** 金刚石具有一系列优异的物理化学性能,特别是独特的电学和热学性能,使其在半导体领域具有极佳的应用前景。通过详细评述金刚石的各种性能,以及与其他半导体材料的性能比较,提出了金刚石在半导体器件应用领域优势。详细介绍了金刚石半导体掺杂以及金刚石半导体器件的种类和应用,并在此基础上展望了金刚石在半导体领域的应用。

**关键词** 金刚石 半导体 掺杂

## Progress in Diamond Semiconductor

XIONGLiwei<sup>1,2</sup>, WANGJianhua<sup>1,2</sup>, MAN Weidong<sup>2</sup>, LIU Changlin<sup>2</sup>, WENGLJun<sup>2</sup>

(1 Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;2 Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials of Hubei Province, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073)

**Abstract** Diamond is a perfect material with tremendous potential in the semiconductor field due to its extreme physical and chemical properties, especially its unique electronic and thermal properties. The advantages of diamond are shown by reviewing the properties of diamond and comparing it with other semiconductors. The doping of diamond, the classification of diamond semiconductor device and their applications are introduced in detail. And finally, the application potentials of diamond semiconductor are prospected based on the discussion.

**Key words** diamond, semiconductor, doping

金刚石是一种宽禁带半导体材料,既能作为有源器件材料(如场效应管、功率开关等),也能作为无源器件材料(如肖特基二极管)应用于半导体技术领域。此外,由于金刚石具有极高的电荷迁移率<sup>[1]</sup>(大于 $3000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )以及现有物质中最高热导率,使得金刚石基半导体器件能够在高频、高功率、高电压以及十分恶劣的环境中运行,因此金刚石是一种极具优势的半导体材料。

### 1 金刚石的性质

金刚石具有最高的硬度和高的弹性模量,在机械加工领域应用十分广泛,包括金刚石砂轮<sup>[2]</sup>、厚膜焊接刀具<sup>[3]</sup>、薄膜涂层刀具<sup>[4]</sup>、涂层钻头<sup>[5]</sup>等。由于金刚石具有极高的热导率(大于 $2000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),因此可以作为高功率激光的精确光学元件<sup>[6]</sup>、高能物理研究的探测材料<sup>[7]</sup>以及电信工业中的热沉材料<sup>[8]</sup>。此外,金刚石以其独特的光学性能(包括从紫外到微波频段的优良透过性能)和高的热导率以及低的热膨胀系数成为极好的光学窗口材料,在导弹头罩、雷达窗口等方面具有极大的优势<sup>[9,10]</sup>。

金刚石作为半导体材料的优势主要体现在禁带宽度、介质击穿场强、载流子迁移率、热导率等方面。

#### 1.1 禁带宽度和热导率

金刚石的禁带宽度( $5.47\text{eV}$ )相对于 Si ( $1.1\text{eV}$ )、4H-SiC

( $3.2\text{eV}$ )和 GaN ( $3.44\text{eV}$ )具有很好的优势,因此,金刚石作为一种宽禁带半导体材料,可以用于制备工作温度远高于上述3种材料的高温器件<sup>[11]</sup>。当然,金刚石在高温器件方面的优势还取决于其极高的热导率,这一优势不仅在很大程度上提高了金刚石器件的工作温度,还极大地减小了器件的尺寸和质量。因此,宽的禁带宽度和高的热导率使得金刚石在制作高温器件方面具有绝对的优势。

#### 1.2 介质击穿场强

金刚石具有最高的介质击穿理论预算值,其范围是 $5\sim 10\text{MV}/\text{cm}$ <sup>[12]</sup>,而4H-SiC和 GaN的介质击穿场强值分别为 $3\text{MV}/\text{cm}$ 和 $4.5\text{MV}/\text{cm}$ 。

#### 1.3 载流子迁移率

在所有的宽禁带半导体材料中单晶 CVD 金刚石在室温下具有最高的电子和空穴迁移率,测量结果表明<sup>[13-15]</sup>,本征单晶 CVD 金刚石的电子和空穴迁移率分别为 $4500\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $3800\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ,而4H-SiC相应的数值仅为 $900\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $120\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

#### 1.4 载流子饱和速率

大量测量结果表明<sup>[16-18]</sup>,金刚石中电子和空穴的饱和速率分别为 $(1.5\sim 2.7)\times 10^7\text{cm}/\text{s}$ 和 $(0.85\sim 1.2)\times 10^7\text{cm}/\text{s}$ 。在其他宽禁带半导体材料中,只有 SiC 能够达到与金刚石相当的数值,但金刚石有其独特的优势,即其饱和速率是在

\*湖北省教育厅项目(Q20081505)

熊礼威:男,1983年生,博士生,主要从事金刚石薄膜的制备及其应用研究 E-mail:zhily2000@126.com

10kV/cm左右的电场中达到的,而SiC的饱和速率只有在在其击穿电场附近才能达到,这样高的电场在SiC器件中是很难实现的。

### 1.5 其他性质

Johnson指数(JFM)、Keyes指数(KFM)和Baliga指数(BFM)是表征材料半导体性能常用的3个指数。金刚石的JFM值为8200,与4H-SiC(410)和GaN(280)相比具有非常大的优势<sup>[19]</sup>。此外,测试结果表明<sup>[20]</sup>,CVD金刚石、4H-SiC和GaN的KFM/BFM值分别为32/17200、5.1/290和1.8/910。

综上所述,金刚石是一种十分理想的半导体材料,在半导体器件领域具有极广阔的应用前景,对金刚石半导体器件的研究必将成为今后半导体领域的热点之一。

## 2 金刚石半导体器件

金刚石半导体器件主要分为高功率电子器件和高频电子器件,高功率电子器件主要是金刚石基二极管,而高频电子器件则主要是金刚石场效应晶体管<sup>[21,22]</sup>。

### 2.1 金刚石基二极管

金刚石基二极管主要有同质结<sup>[23-27]</sup>(肖特基接触、p-n结)和异质结<sup>[28,29]</sup>2种类型。由于目前金刚石n型掺杂技术缺失,纯粹的金刚石p-n结二极管还比较少见,常见的金刚石同质结二极管多为肖特基二极管。

早期的金刚石肖特基二极管是在金刚石/Si衬底上的金欧姆接触,该器件在50条件下具有很高的整流比,但当温度达到500时器件的效率明显降低<sup>[25]</sup>。为了避免这一问题,Vescan等<sup>[26]</sup>采用W-Si基难熔肖特基金属实现欧姆接触,该功率器件在真空中(避免金刚石氧化)可以在1000左右运行,但当温度高于1000时,金属与金刚石的界面会形成碳化物,从而导致器件失效。为此,Zimmermann等<sup>[27]</sup>提出了一种新结构(如图1所示),即在该结构中使用氮掺杂的超纳米晶金刚石薄膜来取代难熔金属,这种纯碳基p-n结解决了金属-金刚石界面形成碳化物的问题,并且在一定程度上提高了器件的热稳定性。以该结构为基础制作的器件在真空中的测试结果表明,在工作温度为1050时,器件仍保持良好的*I-V*特性,没有出现明显的退化。

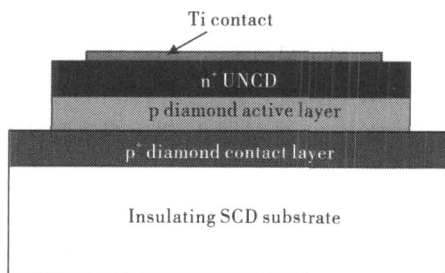


图1 金刚石基肖特基二极管截面图

Fig.1 Schematic cross-section of diamond based Schottky diode

与同质结二极管相比,金刚石异质结二极管的研究则较少。Miskys等<sup>[28]</sup>采用n型六方AlN材料和p型掺杂的金刚

石形成异质p-n结,该结构能获得良好的二极管性能,但由于该结构只有在电流垂直流过p-n结的情况下才能工作,在界面处容易形成可以移动的二维电荷积聚,因此需要(111)取向非常好的金刚石基底来获得高度规则的界面,这在技术方面是很难实现的。Wang等<sup>[29]</sup>采用立方氮化硼(c-BN)与金刚石形成异质结制作了金刚石二极管,该异质结结构也存在上述界面问题。由此可见,金刚石异质结二极管的发展主要受到p-n结界面问题的影响,这在极大程度上限制了金刚石异质结二极管的发展,成为目前亟待解决的问题。

### 2.2 金刚石场效应晶体管

金刚石FET按照其结构可以分为普通型FET、掺杂型FET和表面通道型FET3类<sup>[30]</sup>。

普通型FET由简单的金刚石本征层、掺杂层和电极组成,早期的FET多采用竖直结构,即源和漏处于器件的不同侧,其结构如图2所示<sup>[31]</sup>。由于这种竖直结构FET对器件的处理过程要求很高,例如沟道的刻蚀以及高纵横比结构的制作,因此该结构的FET器件目前仍处于发展阶段。

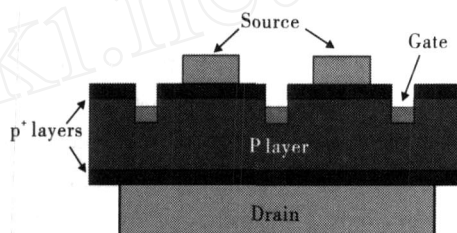


图2 竖直结构的金刚石基场效应管截面图

Fig.2 Cross-section of diamond based vertical FET

用于高频器件的FET多为横向结构<sup>[32-34]</sup>。由于在这种简单的FET结构中难以获得很好的频率特性,Kobe Steel<sup>[35]</sup>基于Ikeda等的空间电荷理论提出了一种p-i-p MISFET结构(如图3所示)。在这种设计中,绝缘栅和金属沉积在沟道内部,流经栅极的电流受到空间电荷的限制,因此这种设计并不适用于高功率转换处理。另外,这种设计对栅极沟槽的刻蚀精度要求非常高,因为源漏极之间的电流对栅极有效长度十分敏感。

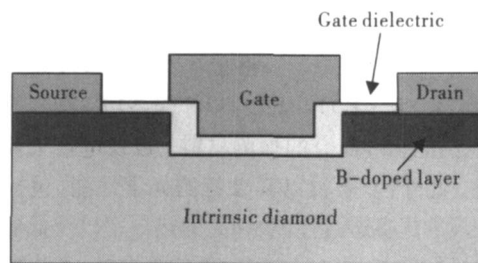


图3 金刚石基p-i-p MISFET截面图

Fig.3 Cross-section of diamond based p-i-p MISFET

掺杂型FET的设计由Ulm大学提出<sup>[36]</sup>。在这种结构中,掺杂层非常薄(理想厚度为几个原子层),夹在2层未掺杂金刚石本征层之间。由于空穴在狭窄的掺杂层中会发生外扩散,使得传导同时发生在掺杂层和本征层中。掺杂层中的迁移率在高掺杂浓度( $10^{20} \text{ cm}^{-2}$ )时很低,介于1~

10 cm<sup>2</sup>/(V·s)之间,而在未掺杂层中,迁移率可以接近本征金刚石,因此该结构具有很好的高频特性<sup>[37]</sup>。一般的掺杂型 FET 结构中,都包括 G 极凹坑和 G 极场板 2 个结构,如图 4 所示<sup>[38-39]</sup>。G 极凹坑的引入可以通过降低表面电荷来有效地控制薄层电荷密度  $n_s$ ,从而避免表面电荷对器件性能的影响。G 极场板可以降低 G 极接触点的最大电场,从而获得更高的最大漏极电压  $V_D^{max}$ 。目前这种设计已经获得了很大发展,并且出现了很多改进的结构,如使用肖特基 G 极的掺杂型 FET<sup>[40]</sup>、带有 B/N 结的掺杂型 FET<sup>[41]</sup>等,但该设计还存在一个最大的难点,即如何将各层中总体的载流子迁移率提高到最大值,以提高器件的工作频率。

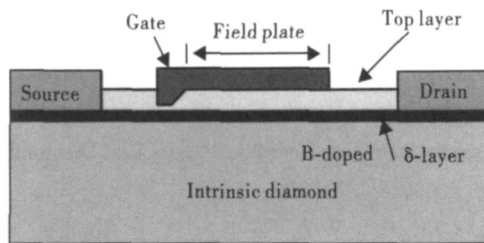


图 4 金刚石基掺杂型 FET

Fig. 4 Cross-section of diamond based -channel FET

表面传导 FET 是利用氢饱和金刚石的表面特性设计的。研究表明,对金刚石进行表面氢化会在表面以下几纳米的金刚石层中形成二维的空穴通道。利用这一特性,研究人员设计了表面传导 FET 结构,如图 5 所示<sup>[42]</sup>。目前表面传导 FET 主要有表面传导金属-半导体 FET(MESFET)和金属-绝缘体-半导体 FET(MISFET) 2 种类型,由于表面 p 型通道具有非常低的漏电电流和很高的击穿电压,以该模型为基础的场发射晶体管是目前唯一能够获得几十 GHz 级别关断频率的器件。以 CaF<sub>2</sub> 为 G 极绝缘材料、G 极长度为 0.7μm 制作的 MISFET 可以获得 11 GHz 的关断频率,其最大振动频率可以达到 18 GHz<sup>[33]</sup>,设计模拟表明,当 G 极长度变为 0.25μm 时,器件的  $f_T$  理论值可以达到 40 GHz<sup>[43]</sup>。虽然器件设计模拟结果都十分理想,但在实际制作及应用中仍存在许多问题需要解决,例如这种表面 FET 的长期稳定性能,特别是在较高温度和较苛刻的环境下的稳定性还需要进行进一步研究。

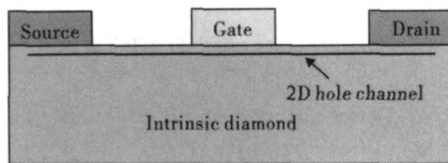


图 5 金刚石基表面传导 FET

Fig. 5 Cross-section of diamond based surface channel FET

### 3 金刚石半导体的应用

很多国家的科研工作者在金刚石半导体的应用方面进行了大量研究工作,其中最为突出的是英国的 Element Six 公司、德国的 Ulm 大学以及日本的 NTT 基础研究实验室。

2002 年 Element Six 公司在 Science 杂志上公布了他们在自支撑单晶 CVD(SSC-CVD)金刚石膜研究方面的重大进展<sup>[11]</sup>,并以此为基础,与 Ulm 大学合作开发 SSC-CVD 金刚石基 MESFET。2008 年 Hajj 等<sup>[37]</sup>报道了该团队的最新成果:在高温高压法合成的(100)取向 Ib 型单晶金刚石基底上获得了通道,并在此基础上制作了 MISFET,其显微图片及小信号特性如图 6 所示,该器件的  $f_T$  和  $f_{max}$  分别达到 1GHz 和 3GHz。

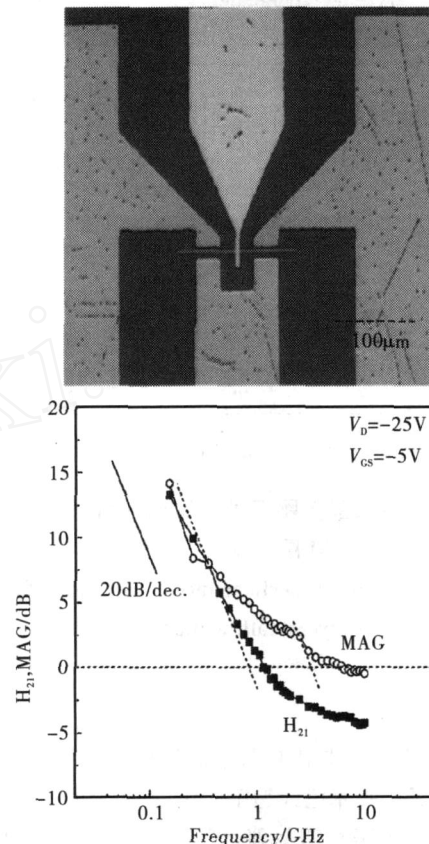


图 6 在单晶金刚石上制作的通道型 MISFET 的显微照片及其小信号特性

Fig. 6 Micrograph and small signal characteristics of -channel MISFET fabricated on single crystal diamond substrate

与此同时,NTT 实验室在多晶金刚石膜研究获得突破的基础上<sup>[44]</sup>与 Ulm 合作进行了表面传导 FET 的研制与开发,研制的 FET 器件目前已经可以在 1GHz 的工作频率下获得 2.1W/mm 的峰值功率<sup>[45]</sup>。此外,由英国工贸部支持的 CAPE 团队也在进行相关研究。该团队由 Element Six, Dynex 半导体公司以及剑桥大学工程系组成,目前已经将金刚石基高功率器件试用于卫星通讯、信号中转站和高分辨率相阵雷达等领域<sup>[46]</sup>。

其他国家的研究人员在金刚石半导体的应用方面也进行了大量研究工作,如意大利罗马 Tre 大学的 Calvani 等<sup>[47]</sup>在多晶金刚石基底上进行了表面通道型 FET 的研究工作,图 7 为他们所设计的 MESFET 的扫描电镜图片以及该器件的射频特性,实验结果表明,在该器件上  $f_T$  值可达 10GHz,最大频率可达 35GHz。

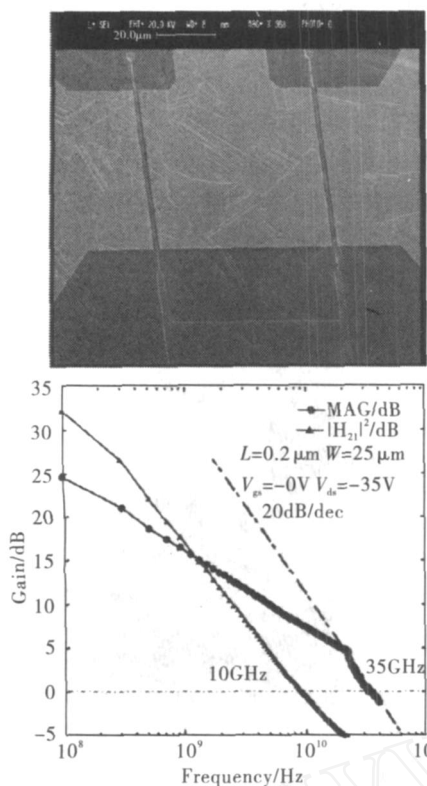


图7 在多晶金刚石膜上制作的MESFET的SEM图片及其射频特性

Fig.7 SEM and RF performance of MESFET fabricated on polycrystalline diamond film

#### 4 结语

随着CVD合成技术的发展,自支撑单晶本征金刚石的制备以及硼掺杂技术已经趋于成熟,这为金刚石基半导体器件的发展提供了坚实的基础。但在金刚石半导体应用领域还存在许多问题需要解决:

(1) 金刚石n型掺杂技术的发展。目前n型掺杂的匮乏严重影响了金刚石半导体的应用,若能找到一种理想的金刚石n型掺杂方法,将极大地拓宽金刚石半导体的应用领域。

(2) 大量高质量、超高纯度、具有半导体性能的金an石材料的制备。目前金刚石单晶以及高质量多晶金刚石膜的制备技术已经取得了一定进展,但其制备成本还比较高,而且暂时还难以达到大批量生产的要求。此外,还没有找到一种可控的、在金刚石中通过掺杂提供载流子方法。因此,获得更为理想的金刚石膜制备及掺杂技术也是亟待解决的问题。

(3) 处理薄层和微结构的能力。在金刚石半导体器件的制作过程中,一般都要涉及到微结构的加工处理,而器件的性能在很大程度上会受到这些加工结果的影响。

由此可见,高质量金刚石膜批量生产技术、掺杂技术以及微加工技术的发展将极大地推动金刚石在高温二极管、高功率/高压开关、高频FET等方面的应用,为金刚石半导体的产业化提供基础。

#### 参考文献

- 1 Isberg J, Hammersberg J, Johansson E, et al. High carrier mobility in single-crystal plasma-deposited diamond[J]. Science, 2002, 297(6): 1670
- 2 Xie J, Tamaki J. In-process evaluation of grit protrusion feature for fine diamond grinding wheel by means of electro-contact discharge dressing [J]. J Mater Proc Techn, 2006, 180(1-3): 83
- 3 Moseley S G, Bohn K P, Goedicke-meier M. Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PCD) cutters: Wear and fracture mechanisms [J]. Int J Refractory Metals and Hard Mater, 2009, 27(2): 394
- 4 Sun F H, Zhang Z M, Chen M, et al. Improvement of adhesive strength and surface roughness of diamond films on Co-cemented tungsten carbide tools [J]. Diamond Related Mater, 2003, 12(3-7): 711
- 5 Meng X M, Tang W Z, Hei L F, et al. Application of CVD nanocrystalline diamond films to cemented carbide drills [J]. Int J Refractory Metals and Hard Mater, 2008, 26(5): 485
- 6 Thumm M. MPACVD-diamond windows for high-power and long-pulse millimeter wave transmission [J]. Diamond Related Mater, 2001, 10(9-10): 1692
- 7 Wallny R S. Status of diamond detectors and their high energy physics application [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 582(3): 824
- 8 Young T F. Fabrication and thermal analysis of copper/diamond/copper thermal spreading device [J]. Surf Coat Techn, 2007, 202(4-7): 1208
- 9 Klein C A. Diamond windows and domes: Flexural strength and thermal shock [J]. Diamond Related Mater, 2002, 11(2): 218
- 10 Ying X T, Luo J L, Wang P N, et al. Ultra-thin freestanding diamond window for soft X-ray optics [J]. Diamond Related Mater, 2003, 12(3-7): 719
- 11 Vescan A, Daumiller I, Gluche P, et al. Very high temperature operation of diamond schottky diode [J]. IEEE Electron Device Lett, 1997, 18(11): 556
- 12 Geis M W. Device quality diamond substrates [J]. Diamond Related Mater, 1992, 1(5-6): 684
- 13 Borst T H, et al. Boron-doped homoepitaxial diamond layers-fabrication, characterization, and electronic applications [J]. Phys Status Solidi A: Appl Res, 1996, 154(1): 423
- 14 Pan L S, et al. Electrical properties of high quality diamond films [J]. Diamond Related Mater, 1993, 2(5-7): 820
- 15 Somogyi K. Classical approximation for ionized impurity scattering applied to diamond monocrystals [J]. Diamond Related Mater, 2002, 11(3-6): 686

- 16 Fox B A , Hartsell M L ,et al. Diamond devices and electrical properties [J]. *Diamond Related Mater* ,1995 ,4(5-6) :622
- 17 Chris J H W , Richard S B. Diamond as an electronic material [J]. *Mater Today* ,2008 ,11(1-2) :22
- 18 Oshiki Y , Kaneko J H ,et al. Saturation drift velocity measurement for CVD diamond by combination of a charge distribution measurement and a TOF method using a UV pulse laser [J]. *Diamond Related Mater* ,2006 ,15(10) :1508
- 19 Aleksov A , Kubovic M , Kaeb N , et al. Diamond field effect transistor—Concepts and challenges [J]. *Diamond Related Mater* ,2003 ,12(3-7) :391
- 20 Rezek B , Nebel C E. Electronic properties of plasma hydrogenated diamond surface: A microscopic study[J]. *Diamond Related Mater* ,2005 ,15(9) :1374
- 21 Taylor P D , Chamund D J ,et al. Applications of high voltage power semiconductor devices : Potential for diamond electronics [J]. *Ind Diamond Rev* ,2006 ,2(1) :19
- 22 Hudgins J L. A review of modern power semiconductor devices [J]. *Microelectronics J* ,1993 ,24(1-2) :41
- 23 Butler J E , Geis M W , Krohn K E , et al. Exceptionally high voltage Schottky diamond diodes and low boron doping [J]. *Semicond Sci Techn* ,2003 ,18(3) :S67
- 24 Twitchen D J , Whitehead A J , Coe S E , et al. High-voltage single-crystal diamond diodes [J]. *IEEE Transaction on Electron Devices* ,2004 ,51(5) :826
- 25 Gluche P , Wolter S D , Borst T H , et al. Highly rectifying Au-contacts on diamond-on silicon substrate [J]. *IEEE Electron Device Lett* ,1996 ,17(6) :270
- 26 Wade M , Muret P , Omnes F , et al. Technology and electrical properties of ohmic contacts and Schottky diodes on homoepitaxial layers grown on (100) diamond surfaces [J]. *Diamond Related Mater* ,2006 ,15(4-8) :614
- 27 Zimmermann T , Kubovic M , Denisenko A , et al. Ultrananocrystalline/single crystal diamond heterostructure diode [J]. *Diamond Related Mater* ,2005 ,14(3-7) :416
- 28 Miskys C R , Garrido J A ,et al. AlN/diamond heterojunction diodes [J]. *Appl Phys Lett* ,2003 ,82(2) :290
- 29 Wang C X ,et al. High-quality heterojunction between p-type diamond single-crystal film and n-type cubic boron nitride bulk single crystal [J]. *Appl Phys Lett* ,2003 ,83(23) :4854
- 30 Kohn E , Denisenko A. Concepts for diamond electronics [J]. *Thin Solid Films* ,2007 ,515(10) :4333
- 31 Huang W , Chow T P , Yang J , et al. High-voltage diamond vertical Schottky rectifiers [J]. *IEEE Power Semicond Devices and ICs* ,2005 ,5(23) :319
- 32 Gurbuz Y , Esame O , Tekin I , et al. Diamond semiconductor technology for RF device application [J]. *Solid-State Electronics* ,2005 ,49(7) :1055
- 33 Ishizaka H , Umezawa H , Taniuchi H , et al. DC and RF characteristics of 0.7 $\mu\text{m}$  gate-length diamond metal-insulator-semiconductor field effect transistor [J]. *Diamond Related Mater* ,2002 ,11(3-6) :378
- 34 Hokazono A , Tsugawa K , Umezawa H , et al. Surface p-channel metal-oxide-semiconductor field effect transistors fabricated on hydrogen terminated (001) surfaces of diamond [J]. *Solid-State Electronics* ,1999 ,43(8) :1465
- 35 Kawakami N , Yokota Y , Hayashi K , et al. Device operation of p-i-p type diamond metal-insulator-semiconductor field effect transistors with sub-micrometer channel [J]. *Diamond Related Mater* ,2005 ,14(3-7) :509
- 36 Kohn E , Adamschik M ,et al. Prospects of diamond devices [J]. *J Phys D: Appl Phys* ,2001 ,34(16) :R77
- 37 Hajji H E , Denisenko A , Kaiser A , et al. Diamond MIS-FET based on boron delta-doped channel [J]. *Diamond Related Mater* ,2008 ,17(7-10) :1259
- 38 Denisenko A , Kohn E. Diamond power devices. Concepts and limits [J]. *Diamond Related Mater* ,2005 ,14(3-7) :491
- 39 Mora-Ramos M E. Valence band states in diamond p-delta-doped quantum wells [J]. *Microelectron J* ,2004 ,35(1) :83
- 40 Shiomu H , Nishibayashi Y , Toda N , et al. Pulse-doped diamond p-channel metal semiconductor field-effect transistor [J]. *IEEE Electron Device Lett* ,1995 ,16(1) :36
- 41 Vescan A , Gluche P , Ebert W , et al. High-temperature , high-voltage operation of pulse-doped diamond MESFET [J]. *IEEE Electron Device Lett* ,1997 ,18(5) :222
- 42 Umezawa H , Taniuchi H , Arima T , et al. Potential application of surface channel diamond field-effect transistors [J]. *Diamond Related Mater* ,2001 ,10(9-10) :1743
- 43 Matsudaira H , Takuya A , Umezawa H , et al. Deep sub-micron gate diamond MISFETs [J]. *Diamond Related Mater* ,2003 ,12(10-11) :1814
- 44 Kasu M , Kobayashi N. High hole mobility at room temperature in hydrogen-terminated (001) diamond [J]. *Appl Phys Lett* ,2002 ,80(21) :3961
- 45 Kasu M , Ueda K , Ye H , et al. High RF output power for H-terminated diamond FETs [J]. *Diamond Related Mater* ,2006 ,15(4-8) :783
- 46 Doneddu D , Guy O J ,et al. X-ray photoelectron spectroscopy studied on the formation of chromium contacts to single-crystal CVD diamond [J]. *Surf Sci* ,2007 ,602(6) :1135
- 47 Calvani P , et al. DC and RF performance of surface channel MESFETs on H-terminated polycrystalline diamond[J]. *Diamond Related Mater* ,2009 ,18(5-8) :786

(责任编辑 王 炎)