

六方碳化硅中的深能级缺陷*

凌志聪^{1,†} 陈旭东¹ 冯汉源¹ C. D. Beling¹ 龚敏²
葛惟锷³ 王建农³ G. Brauer⁴ W. Anwand⁴ W. Skorupa⁴

(1 香港大学物理系 香港)

(2 四川大学物理学院 成都 610064)

(3 香港科技大学物理系 香港)

(4 Institut für Ionenstrahlphysik and Materialforschung, Forschungszentrum Rossendorf, Dresden, Germany)

摘要 文章作者利用深能级瞬态谱(DLTS),正电子湮灭谱(PAS)和光致荧光谱(PL)等谱分析技术研究了六方碳化硅中具有电活性的深能级缺陷。这些深能级缺陷分别通过不同能量的电子辐照、中子辐照,或氦离子注入等产生。经过研究和分析各种实验测试的相关图谱,作者给出了六方碳化硅中一些重要的深能级缺陷在可控辐照条件下产生和退火行为的研究结果以及这些深能级缺陷相关结构的实验依据。

关键词 六方碳化硅,电子辐照,深能级缺陷,正电子湮灭

Deep level defects in 6H silicon carbide

C. C. Ling^{1,†} X. D. Chen¹ S. Fung¹ C. D. Beling¹ M. Gong²
W. K. Ge³ J. N. Wang³ G. Brauer⁴ W. Anwand⁴ W. Skorupa⁴

(1 Department of Physics, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

(2 Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(3 Department of Physics, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

(4 Institut für Ionenstrahlphysik and Materialforschung, Forschungszentrum Rossendorf, Dresden, Germany)

Abstract We have investigated the electrically active deep level defects in n-type 6H silicon carbide through the use of a series of complimentary spectroscopic techniques such as deep level transient spectroscopy, positron annihilation spectroscopy and photoluminescence. The deep level defects were created by neutron irradiation, He implantation and electron irradiation with different energies. After analysis of the information gained from the different types of spectroscopy, as well as consideration of the defect creation and annealing behavior under different controlled environments, we provide experimental evidence for the microstructure of certain important deep level defects.

Key words 6H-SiC, electron irradiation, deep level defect, positron annihilation

碳化硅(SiC)作为一种宽禁带半导体材料,具有独特的物理和电学特性,是制作高温、大功率和高频器件[例如,场效应晶体管(FET's)、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET's)、结型场效应晶体管(JFET's)、金属半导体场效应晶体管(MESFET's)以及双极晶体管]的合适材料,因此受到越来越多的关注^[1]。离子注入和电子辐照在半导体器件工艺中可分别用来掺杂以及载流子寿命控制。另外,文献报道碳化硅中的³⁰Si原子能够俘获热中子形成³¹

Si,然后发生衰变成为掺杂原子³¹P,即中子嬗变掺杂(NTD),它是一种碳化硅中磷掺杂的可行技术。在碳化硅器件工艺中,即使在1800℃扩散条件下,大部分掺杂剂的扩散效率仍然较低,因此,离子注入或中子嬗变被认为是比较可行的掺杂工艺技术。

* 香港特区研究资助局和香港大学教育研究基金(批准号:7085/01P)资助项目

2004-05-08收到初稿,2004-08-12修回

† 通讯联系人, E-mail: cccling@hku.hk

但是,离子注入或中子嬗变都不可避免地碳化硅材料中引入具有电活性的深能级缺陷,而且部分缺陷具有相当高的热稳定性,甚至能抗高达 1800℃ 的退火处理.因此,碳化硅材料中深能级缺陷的研究和理解是成功制作器件的基础.

深能级瞬态谱(DLTS)是一种广泛应用的探测半导体材料中深能级缺陷的测试方法,其测量精度可达 $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ [2,3].具体到 N 型六方碳化硅(n-6H-SiC),深能级缺陷 $E_C \sim 0.23 \text{ eV}$ (ED_1), $E_C \sim 0.36/0.44 \text{ eV}$ (E_1/E_2), $E_C \sim 0.51 \text{ eV}$ (E_i) 和 $E_C \sim 0.62 \text{ eV}/0.78 \text{ eV}$ (Z_1/Z_2) 分别在中子辐照[4]、电子辐照[5-10]、质子辐照[11-12]和离子注入[7,11,13,14]等实验研究中检测到.图 1(a)为利用深能级瞬态谱在六方碳化硅中检测到的深能级.在深能级瞬态谱测试技术中,主要采用具有整流特性的结型样品(比如肖特基结、 $p^+ - n$ 结或 $n^+ - p$ 结).正向脉冲用来填充深能级陷阱,在反向偏压条件下,耗尽区中的深能级缺陷处于载流子发射状态,通过检测结型样品的瞬态电容变化,采用率窗分析技术,可以方便地测出深能级缺陷载流子发射速率.从而得到相关的缺陷信息(比如能级位置、俘获截面和浓度等).图 1(b)为 N 型六方碳化硅样品零偏压条件下的能带图以及反偏压条件下深能级在耗尽区的俘获与发射示意图.

虽然深能级瞬态谱用来检测深能级缺陷的电学特性时方便可靠,但是深能级瞬态谱却不能提供深能级缺陷相关的结构信息.在实验分析过程中,常用的方法是通过对比研究深能级缺陷的热退火特性,并参照其他能够提供缺陷结构信息的谱分析技术[比如正电子湮灭谱(PAS)[15]或电子顺磁共振(EPR)[16]]所提供的相似热退火特性的缺陷进行分析,从而得到相关深能级缺陷的可能的结构信息.但是,这类研究也存在一些困难,其中之一是不同的测试方法要求的缺陷测量浓度极限差别很大.比如正电子湮灭谱方法要求缺陷浓度 $> 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,电子顺磁共振要求缺陷浓度 $> 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,另外,基于微波穿越的表面效应的原由,电子顺磁共振测试样品的自由载流子的浓度又不能超过 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.深能级瞬态谱缺陷测量浓度极限受样品中自由载流子浓度的影响,本实验样品在自由电子浓度为 $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和深能级缺陷浓度 $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 时才能检测出清楚的深能级信号.对深能级瞬态谱来讲,肖特基结、 $p^+ - n$ 结或 $n^+ - p$ 结是测试的前提条件,为了成功制备肖特基结,深

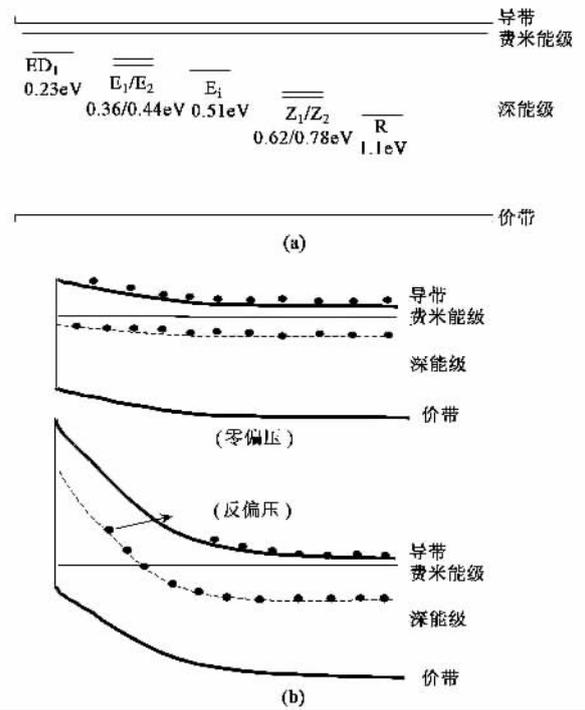


图 1 六方碳化硅中的深能级(a)以及深能级在耗尽区的俘获与发射示意图(b)

能级瞬态谱测试样品的自由载流子的浓度一般不能超过 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.另外,由于不同物理特性,有些缺陷信息检测不到并不就一定就表明该缺陷不存在.比如,样品的费米能级决定缺陷的荷电状态,而缺陷的荷电状态又决定正电子湮灭谱信号和深能级瞬态谱信号.至于光致荧光谱,荧光强度很大程度上依赖于载流子在缺陷中心的复合机理,即分为发光复合中心和不发光复合中心两种.因此在不同测试技术分析比较过程中,由于测试样品的差异以及不同的测试机理等因素的影响,深能级瞬态谱测到的深能级缺陷的认证确实存在相当的困难.比如在电子辐照的 N 型碳化硅材料中,深能级瞬态谱显示 E_1/E_2 是最主要的深能级缺陷,但是在中子辐照实验中,发现 E_1/E_2 的浓度相对较低,其浓度随样品的退火温度升高而增加[4],当中子辐照样品经 500℃ 退火处理后, E_1/E_2 浓度达到最大值,然后又随样品退火温度的升高而降低;当再经过 1400℃ 退火处理后, E_1/E_2 信号完全消失.另外,在电子顺磁共振实验中,磁性圆二色散吸收谱(MCDA)和磁性圆二色散吸收探测电子顺磁共振谱(MCDA-EPR)等测试技术也曾用来研究中子辐照 N 型碳化硅材料[17],研究结果发现,磁共振缺陷中心 P6/P7 的热退火行为与中子辐照样品中 E_1/E_2 深能级缺陷

非常相似. 缺陷模型理论研究发现, 只有碳空位加碳反位 ($V_C C_{Si}$) 缺陷结构才能出现实验观测的光激发磁共振现象, 因此认定 P6/P7 缺陷具有 ($V_C C_{Si}$) 结构. 基于此分析, 我们建议 E_1/E_2 深能级缺陷可能具有类似的 $V_C C_{Si}$ 微观结构. 然而, Kawasuso^[10], Aboelfotoh 和 Doyle^[9] 等通过对比正电子湮灭谱、电子顺磁共振和深能级瞬态谱实验结果, 认为 E_1/E_2 可能与硅空位复合体或荷负电的碳空位缺陷有关. 基于 E_1/E_2 缺陷的热稳定性, 我们早期的研究曾猜测 E_1/E_2 可能与具有高形成能和高热稳定性的碳硅双空位 ($V_C V_{Si}$) 有关^[5]. 另外, Eberlein 等^[18] 利用第一性原理 (first-principle) 计算, 发现 E_1/E_2 的电学特性及热稳定性与计算得到的间隙位氮碳复合体 ($N_i - C_i$) 相似, 指出 E_1/E_2 缺陷可能具有 ($N_i - C_i$) 缺陷复合体的结构成分. 因此, N 型六方碳化硅中的深能级 E_1/E_2 缺陷结构模型存在很大的争议.

正电子湮灭谱包括一系列的谱分析技术, 在半导体材料空位型缺陷的测试分析中广泛应用. 其主要原理如下: 当正电子入射到体材料样品中时, 正电子将迅速热离化和扩散. 空位型缺陷在晶体中相当于失去一个带正电的原子核心, 在晶体中形成一个正电子势阱, 因此能够俘获扩散来的正电子. 正电子与晶体中电子相遇时发生湮灭并释放出能量即 γ 光子. 通过检测正电子在半导体材料中湮灭释放出的 γ 光子, 可以得到晶体中空位型缺陷的信息. 正电子寿命谱是正电子湮灭测试技术的一种. 其测试机理是由于不同的空位型缺陷具有特征寿命 (即湮灭速率的倒数取决于缺陷的电子态密度). 因此, 通过测量样品中正电子的寿命, 可以认证样品中存在的空位型缺陷类型. 在我们以前的六方碳化硅正电子寿命谱分析研究中, 检测到碳硅双空位 ($V_C V_{Si}$) 的特征寿命约为 230ps, 并且发现样品经 1700 °C 退火处理后该缺陷才能消除^[19]. 因为 E_1/E_2 在 1400 °C 以下的热退火实验过程中消失, 我们正电子寿命谱分析结果说明 E_1/E_2 不可能具有碳硅双空位缺陷结构.

为了获取六方碳化硅中深能级缺陷的结构信息, 我们最近做了一系列的 N 型六方碳化硅低能电子辐照样品的深能级瞬态谱测试分析^[6]. 实验设计基于入射粒子与样品中的原子发生弹性碰撞的能量传输物理分析, 即在碳化硅晶体中, 碳的原子质量比硅小, 在与入射电子的弹性碰撞过程中, 碳原子获取的最大能量比硅原子大, 因此, 在电子辐照过程中, 移动碳原子所需的阈值能量要比硅原子低.

当电子能量低于移动晶格中碳原子的阈值能量时, 不能产生任何缺陷; 随着辐照电子能量逐渐升高, 当超过移动碳原子的阈值能量时, 电子将碳原子从晶格位置撞出, 从而产生与碳原子移位有关的缺陷 (比如碳空位或碳间隙), 但是不会出现与硅原子移位有关的缺陷; 当入射电子能量超过移动硅原子的阈值能量时, 电子能够将硅原子从晶格位置撞出, 从而产生与硅原子移位有关的缺陷 (比如硅空位或硅间隙), 也有可能出现与碳和硅原子同时都有关的缺陷 (比如双空位或其他更加复杂的缺陷复合体等). 我们设计了系列的 N 型六方碳化硅低能电子辐照实验, 样品的深能级瞬态谱测试分析巧妙地证实了电子能量与移动碳或者硅原子所需的阈值能量关系^[6], 从而清楚地给出了深能级瞬态谱测试结果中深能级所对应的可能缺陷结构. 从图 2 可以看到 0.2MeV 电子辐照的样品中检测不到任何深能级, 但是 0.3MeV 电子辐照能够产生标识为 ED_1 , E_1/E_2 和 E_1 等深能级. 参照电子能量与移动碳或者硅原子所需的阈值能量, 这些深能级应该来源于六方碳化硅晶格中碳原子的移位, 因此它们与碳空位或碳间隙型的缺陷结构有关, 而与硅空位有关的缺陷只能在较高能量的电子辐照的样品中产生.

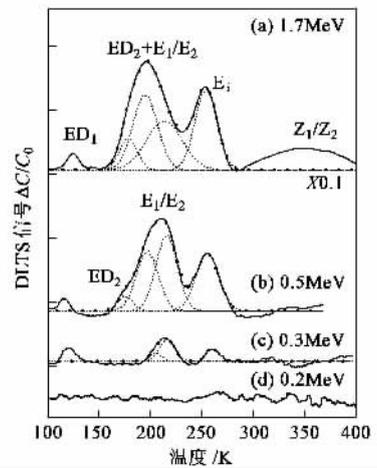


图 2 0.2, 0.3, 0.5, 和 1.7MeV 电子辐照 N 型六方碳化硅的深能级瞬态谱

图 3 给出了 0.3MeV 和 1.7MeV 电子辐照 N 型六方碳化硅光致荧光谱. 在 1.7MeV 电子辐照的样品中, 能够清楚地检测到标注为 V_1 , V_2 和 V_3 的荧光峰. 此荧光峰已被认定为六方碳化硅中硅空位相关的缺陷发光峰. 在 0.3MeV 电子辐照的样品中, 没有类似的信号出现, 说明 0.3MeV 电子辐照不能在六方碳化硅样品中产生与硅空位相关的缺陷. 在

正电子寿命谱和复合多普勒展宽(CDB)分析中, Rempel 等^[20]得出的结论与我们深能级瞬态谱的结果一致. 即在 0.2MeV 电子辐照的样品中, 测不到任何空位型缺陷; 在 0.3MeV 电子辐照的样品中, 碳空位相关的缺陷出现, 但没有硅空位相关的缺陷; 当辐照电子的能量升为 0.5MeV 时, 硅空位相关的缺陷才能探测到.

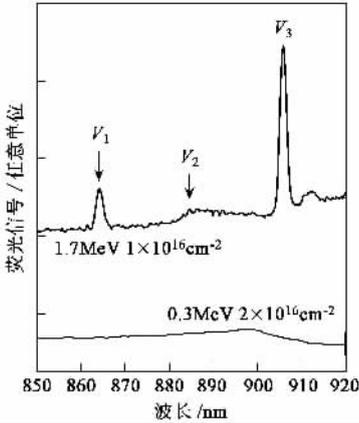


图3 0.3 和 1.7MeV 电子辐照 N 型六方碳化硅的光致荧光谱

至于其他深能级缺陷, 早期的研究发现 Z_1/Z_2 在 1700℃ 热退火实验中仍能存在^[7]. 但近期的研究工作发现它们经 1000℃ 热退火处理时就可以消除^[4,5,9,10]. 图 4 分别给出了中子辐照的 N 型六方碳化硅样品经 500℃, 900℃ 和 1600℃ 热退火处理后的深能级瞬态谱测试结果^[4]. 从图 4 可以看到 Z_1/Z_2 峰在 500℃ 热退火处理的样品中能清楚测到, 在 900℃ 热退火处理的样品中消失. 但是在 1600℃ 热退火处理的样品中, 类似的深能级瞬态谱峰(标识为 NE_1 至 NE_4) 又出现. 在这 4 个峰中, 2 个峰 NE_3 和 NE_4 的能级为 0.64eV/0.68eV, 与 Z_1/Z_2 (0.6eV/0.7eV) 非常相似. 可是我们也发现, NE_3 和 NE_4 缺陷的俘获截面比 Z_1/Z_2 小很多, 因此我们相信, NE_3 和 NE_4 可能不是 Z_1/Z_2 对应的缺陷. 因此极有可能早期报道的 1700℃ 仍然稳定存在的 Z_1/Z_2 , 实际上是热处理产生的极其稳定的 NE_3/NE_4 缺陷. 从图 2 所示的深能级瞬态谱结果中可以看到, 在 1.7MeV 电子辐照的样品中, Z_1/Z_2 深能级信号非常清楚, 极有可能与硅空位缺陷复合体相关而与碳空位缺陷无关. Z_1/Z_2 与硅空位缺陷有关的结论与以下几点一致: (1) 我们发现 Z_1/Z_2 的热退火特性与正电子寿命分析中得到的硅空位缺陷热退火特性很相似^[21]; (2) 光激发正电子寿命分析, 硅空位缺

陷的离化能与深能级瞬态谱测定的 Z_1/Z_2 能级一致^[22].

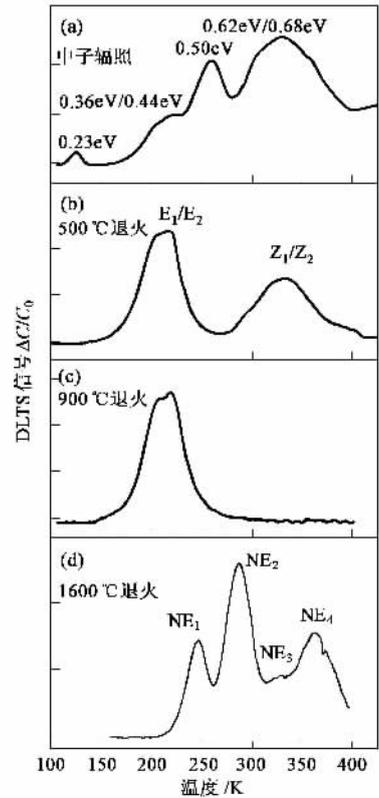


图4 中子辐照和 500, 900, 1600℃ 退火处理后 N 型六方碳化硅的深能级瞬态谱

综上所述, 我们利用相互补充的谱分析技术系统地研究了不同能量电子辐照和退火处理的 N 型六方碳化硅中的深能级, 得出如下结论: ED_1 , E_1/E_2 和 E_i 等深能级与碳空位或碳间隙型的缺陷有关. Z_1/Z_2 的缺陷结构与硅空位缺陷模型一致.

参 考 文 献

- [1] Morkoc H, Strite S, Gao G B *et al.* J. Appl. Phys., 1994, 76:1363
- [2] Lang D V. J. Appl. Phys., 1974, 45:3023
- [3] Palmer D W. In: Growth and Characterisation of Semiconductors, ed. by Stradling R A and Klipstein P C, Institute of Physics Publishing, 1990, 187
- [4] Chen X D, Fung S, Ling C C *et al.* J. Appl. Phys., 2003, 94:3004
- [5] Gong M, Fung S, Beling C D *et al.* J. Appl. Phys., 1999, 85:7604
- [6] Chen X D, Yang C L, Gong M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92:125505
- [7] Pensl G, Choyke W J. Physica B, 1993, 185:264
- [8] Hemmingsson C G, Son T N, Kordina O *et al.* J. Appl. Phys., 1998, 84:704
- [9] Aboelfotoh M O, Doyle J P. Phys. Rev. B, 1999, 59:10823

- [10] Kawasuso A , Redmann F , Krause-Rehberg R *et al.* J. Appl. Phys. , 2000 90 3377
- [11] Dailbor T , Pensl G , Matsunami H *et al.* Phys. Status Solidi (a) , 1997 162 199
- [12] Lebedev A A , Veinger A I , Davydov D V *et al.* J. Appl. Phys. , 2000 88 : 6265
- [13] Frank Th , Weinder M , Itoh H *et al.* Mater. Sci. Forum , 2001 , 353—356 : 439
- [14] Chen X D , Ling C C , Fung S *et al.* Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2004 815 15 1
- [15] Krause-Rehberg R , Leipner H S. Positron Annihilation in Semiconductors , Defect Studies , Springer Verlag , 1999
- [16] Newman R C , In : Growth and Characterisation of Semiconductors. ed. by Stradling B A , Klipstein P C. Institute of Physics Publishing. 1990 119
- [17] Sürman E , Son N T , Chen W M *et al.* Phys. Rev. B 2000 , 61 2613
- [18] Eberlein T A G , Jones R , Briddon P R. Phys. Rev. Lett. , 2003 90 225502
- [19] Ling C C , Chen X D , Gong M *et al.* Mater. Sci. Forum , 2004 445—446 135
- [20] Rempel A A , Sprengel W , Blaurock K *et al.* Phys. Rev. Lett. 2003 , 91 109602
- [21] Ling C C , Beling C D , Fung S. Phys. Rev. B , 2000 62 : 8016
- [22] Arpiainen S , Saarinen K , Hautojärvi P *et al.* Phys. Rev. B , 2002 66 075206

· 物理新闻和动态 ·

超冷一维玻色子系统的费米化

在高温超导机理的研究中 , Anderson P W 曾提出过所谓 Luttinger 液体理论. 该理论基于早年 Luttinger 研究过的“一维精确可解玻色子系统”. 在这一系统中 , 元激发谱与高维系统有本质差别 , 并且与玻色子之间的相互作用密切相关.

这样一个系统的实验模型是在 40 多年前提出来的. 该模型以作者名字命名 , 被称为 Tonks - Girardeau 气体模型. 该模型指出 , 相互排斥的超冷玻色原子气(密度充分稀) 被限制在一维运动 , 原子间的相互作用可由外加电磁场参数进行调节 , 从弱相互作用区域发展到强关联区域. 然而上述模型一直未能在实验上得以实现. 最近来自德国马普光学研究所的 Paredes B 等 , 利用对射激光产生的驻波光学晶格 , 将 ^{87}Rb 超冷原子捕获在极细的“光管”中 , 成功地制备了 Tonks - Girardeau 气体. 实验者首先令玻色 - 爱因斯坦凝聚的 ^{87}Rb 原子处于一个 yz 平面的二维光学晶格中 , 使原子分布于与 yz 平面垂直的一根根“光管”内 , 然后沿 x 轴向引入第三个周期光学势. 由此 , ^{87}Rb 原子在 x 方向的有效质量增强 , 展现出了强关联量子行为.

当相互作用较弱时 , 位于一维“光管”中的 ^{87}Rb 玻色原子可以相互穿越 ; 当相互作用不断增强时 , 玻色原子表现出“费米化”(fermionization) 即不可能有两个 ^{87}Rb 占据同一位置 , 并且它们之间也不可能相互交换位置. 不过 , 实验也表明 , 费米化的一维玻色子系统在动量分布方面并不等同于无相互作用的费米子系统.

专家认为 , Paredes 等的实验所展示的一维量子控制将能促进量子信息、量子计算、量子相干以及强关联现象的研究.

(戴闻 编译自 Nature 2004 429 251 277)

光学元件库 — 欧普特科技

北京欧普特公司参照国际通常规格及技术指标 , 备有完整系列的精密光学零部件 (备有产品样本供参考) 供国内各大院校、科研机构、实验室随时选用 , 我公司同时可为您的应用提供技术咨询。

光学透镜 : 平凸 , 双凸 , 平凹 , 双凹 , 消色差胶合透镜等。直径 1~150mm ; 焦距 1~1000mm ; 材料包括光学玻璃 , 紫外石英玻璃 , 有色光学玻璃 , 红外材料。

光学棱镜 : 1~50mm 各种规格直角棱镜 , 及其它常用棱镜。

光学反射镜 : 各种尺寸规格的镀铝 , 镀银 , 镀金 , 及介质反射镜。直径 5~200mm。

光学窗口 : 各种尺寸规格 , 材料的光学平面窗口 , 平晶。直径 5~200mm。

各种有色玻璃滤光片 : 规格 5~200mm (紫外 , 可见 , 红外)。

紫外石英光纤 : 进口紫外石英光纤 , SMA 接口光纤探头 , 紫外石英聚焦探头。

单位 : 北京欧普特科技有限公司

地址 : 北京市海淀区知春路 49 号

希格玛大厦 B 座 #306 室

电话 : 010-88096218 / 88096217

传真 : 010-88096216

邮编 : 100080

网址 : www.goldway.com.cn

电子邮件 : optics@goldway.com.cn

sms@goldway.com.cn

联系人 : 粟曼珊女士

石冀阳小姐