

The Influence of Oxygen Pressure on Properties of Pulsed Laser Deposited BeMgZnO Quaternary Alloy Thin Films

Ronghuizi Yang, Mingkai Li, Gang Chang, Yinmei Lu*, Yunbin He

School of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan Hubei
Email: yinmei_lu@hubu.edu.cn

Received: May 4th, 2018; accepted: May 20th, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

BeMgZnO quaternary alloy thin films were grown on the c-plane sapphire substrates by pulsed laser deposition (PLD) method using BeMgZnO ceramics target. The films were grown at a fixed substrate temperature of 700°C and various O₂ pressures. X-ray diffraction, X-ray photoelectron spectroscopy and UV-Vis spectrophotometry were used to characterize the films. By Be-Mg co-substitution in ZnO, the solid solubility of Mg in the BeMgZnO quaternary alloy films was increased largely. Even when the Mg content reached 44.4%, no phase segregation was found in the BeMgZnO quaternary alloy thin film. Meanwhile, the band gap of the BeMgZnO film was enlarged to 4.19 eV, and its visible-light transmittance exceeded 85%.

Keywords

BeMgZnO, Quaternary Alloy, Thin Film, Co-Substitution, PLD

氧压变化对脉冲激光沉积法制备BeMgZnO四元合金薄膜性能的影响

杨蓉慧子, 黎明锴, 常 钢, 卢寅梅*, 何云斌

湖北大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉
Email: yinmei_lu@hubu.edu.cn

收稿日期: 2018年5月4日; 录用日期: 2018年5月20日; 发布日期: 2018年5月28日

*通讯作者。

文章引用: 杨蓉慧子, 黎明锴, 常钢, 卢寅梅, 何云斌. 氧压变化对脉冲激光沉积法制备 BeMgZnO 四元合金薄膜性能的影响[J]. 材料科学, 2018, 8(5): 559-566. DOI: [10.12677/ms.2018.85065](https://doi.org/10.12677/ms.2018.85065)

摘要

本工作采用脉冲激光沉积法,以BeMgZnO陶瓷为靶材、c面蓝宝石为衬底,在固定衬底温度700°C、改变沉积氧压条件下制备BeMgZnO四元合金薄膜。采用X射线衍射、X射线光电子能谱、紫外-可见光谱法系统表征研究了这些薄膜。结果表明,通过Be-Mg共取代ZnO,有效提高了Mg在合金薄膜中的含量。当Mg的含量达到44.4%时,BeMgZnO薄膜中仍无相分离发生,并且此时BeMgZnO薄膜的带隙达到4.19 eV,在可见光波段的透过率也高达85%。

关键词

BeMgZnO, 四元合金, 薄膜, 共取代, 脉冲激光沉积

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

ZnO作为一种重要的II-VI族氧化物半导体,具有优异的光学和电学特性,从而在太阳能电池、传感器、探测器、发光二极管和激光器等领域[1][2][3]都有应用。虽然已经历了数十年的研究,ZnO依旧是当前宽禁带半导体领域研究的热点之一。

近年来,ZnO薄膜发光器件[4]和探测器器件[5]正在向紫外和深紫外光器件发展。ZnO室温下的带隙宽度为3.37 eV,进一步提高ZnO的带隙是制备深紫外光器件的关键因素之一。许多研究者都选择了对ZnO薄膜进行掺杂取代的方法来调控ZnO薄膜的带隙宽度。一般掺杂取代的元素类型包括:同价阳离子掺杂(如:Be²⁺、Mg²⁺等[6]),阴离子掺杂(如:S²⁻等[7]),阴阳离子共掺[8][9][10]等。其中,Mg元素因其氧化物的禁带宽度(7.8 eV)大、化合价与Zn相同,以及Mg²⁺(0.57Å)的离子半径与Zn²⁺(0.60Å)的离子半径相近[11],使得Mg掺杂取代ZnO得到的MgZnO三元合金薄膜具有更大的带隙宽度和较小的晶格失配,从而从众多的掺杂元素中脱颖而出。然而,由于MgO(岩盐矿)与ZnO(纤锌矿)具有不同的晶体结构,随着Mg含量的增加,MgZnO合金薄膜将发生由纤锌矿结构向岩盐矿结构的转变。Ohtomo等人首先发现当Mg含量高于33%时,MgZnO合金会发生相分离,此时Mg_{0.33}Zn_{0.67}O合金的带隙宽度达到了3.99 eV[12]。为了进一步提高薄膜的带隙宽度,Su等人利用第一性原理计算方法对Be和Mg共取代ZnO的带隙调控进行了研究,理论上证明了Be-Mg共掺杂ZnO系统相较于Be掺杂ZnO系统具有更好的稳定性,并能得到更大的带隙宽度[13]。随后,Zhu等人在微观上解释了Be与Mg共掺杂相互稳定的机制[14]。这些研究表明,与MgZnO三元合金薄膜相比,四元合金薄膜BeMgZnO在高Mg含量的情况下仍可能保持单相纤锌矿结构,同时进一步增大薄膜带隙宽度。

目前,有关BeMgZnO四元合金薄膜的研究报道还很少,除了Vettumperumal等采用了溶胶凝胶方法[15],大部分研究都采用分子束外延(MBE)[16][17]和等离子体辅助分子束外延(PA-MBE)[18][19]等复杂昂贵的技术来制备BeMgZnO四元合金薄膜。本工作通过简单易行的脉冲激光沉积法(PLD: pulsed laser deposition),采用自制的BeMgZnO陶瓷靶材,直接在c面蓝宝石上沉积BeMgZnO四元合金薄膜。我们发现即使没有任何缓冲层存在的情况下,BeMgZnO四元合金薄膜在高Mg含量时,仍然可以保持单相

纤锌矿结构，并具有良好的结晶质量。

2. 实验

2.1. BeMgZnO 四元合金薄膜的制备

我们采用脉冲激光沉积法，以传统陶瓷烧结技术自制的 BeMgZnO 陶瓷作为靶材，在 c-Al₂O₃ 衬底上生长 BeMgZnO 四元合金薄膜。脉冲激光沉积法制备薄膜原理如图 1 所示。实验中使用的准分子激光器 (Lambda Physik COMPEX PRO 205F) 的脉冲激光波长为 248 nm、能量为 350 mJ/pulse、重复频率为 5 Hz。首先，将 c 面蓝宝石衬底放入管式炉中在 1100°C 条件下退火 1 小时，消除衬底中的应力及表面吸附杂质，以利于制备高质量的 BeMgZnO 四元合金薄膜。退火后的衬底在丙酮、无水乙醇及去离子水中依次清洗 15 分钟，以去除其表面油污及其它杂质，随后用高纯氮气吹干，并固定在衬底托上立即放入真空腔内。沉积薄膜前，将真空腔的真空度抽至 10⁻⁴ Pa 左右。设定工艺参数：靶材自转 5 r/min、基片自转 10 r/min、沉积温度为 700°C、沉积时间为 60 分钟，通过改变通入真空腔的氧气流量，在不同氧压下(0 Pa~4 Pa)制备不同成分的薄膜样品。

2.2. BeMgZnO 四元合金薄膜的表征

本工作采用四圆高分辨 X 射线衍射仪(HR XRD, D8 discover, Bruker, CuK α 1, $\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$)来分析 BeMgZnO 四元合金薄膜的晶体结构。薄膜各成分的含量变化用 X 射线光电子能谱(XPS, Escalab 250Xi, Thermo Scientific)进行表征。紫外分光光度计(UV 3600, Shimadzu)用来表征薄膜在室温下的光学性能。

3. 结果与讨论

图 2 为 BeMgZnO 四元合金薄膜的 X 射线衍射(XRD) θ - 2θ 扫描图谱。从 20°到 80°的 XRD 全谱图(图 2(a))中可以看到强度高且锐的蓝宝石衬底(006)面的衍射峰和 BeMgZnO 薄膜的(002)及(004)面的衍射峰，表明我们在 0~4 Pa 间的不同氧压条件下成功生长出了单相、具有纤锌矿结构和 c 面取向的 BeMgZnO 合金薄膜。

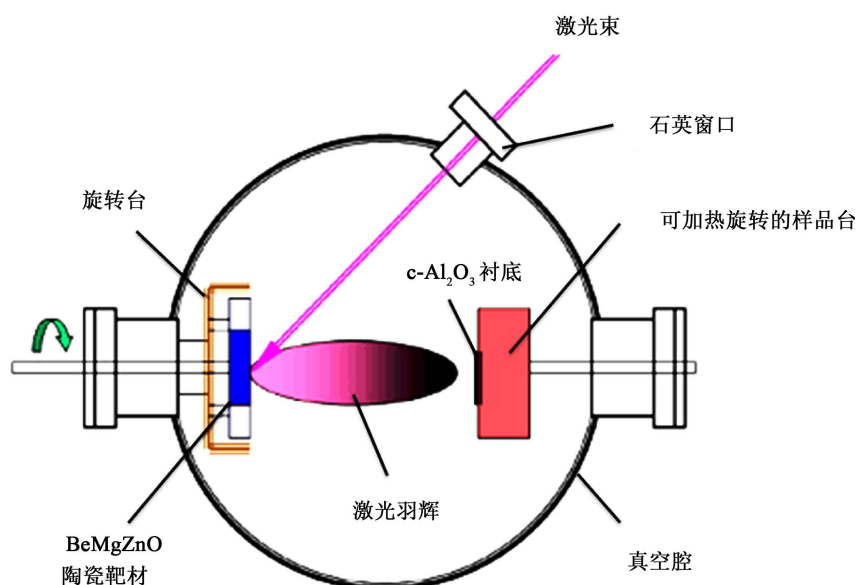


Figure 1. The schematic diagram for pulsed laser deposition of BeMgZnO quaternary alloy films
图 1. 脉冲激光沉积法制备 BeMgZnO 四元合金薄膜原理示意图

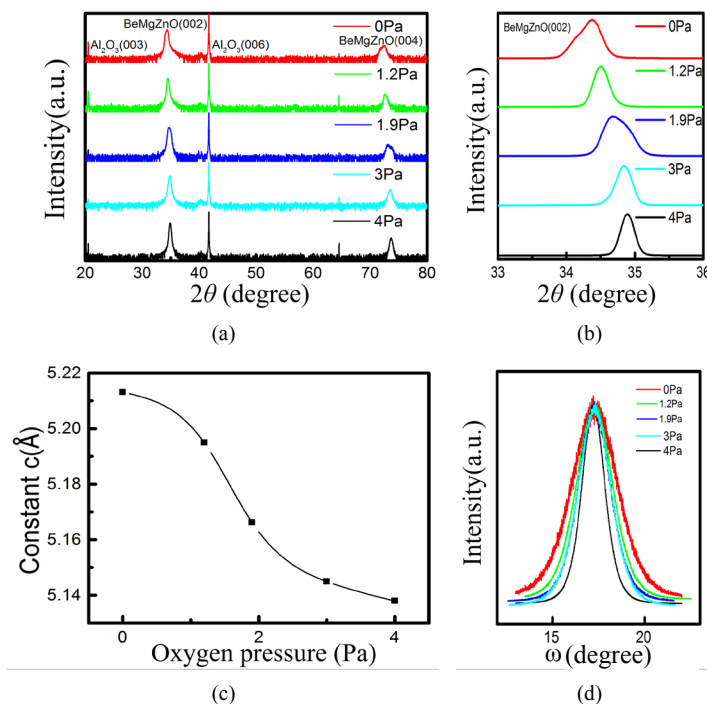


Figure 2. The θ - 2θ scan XRD patterns of the BeMgZnO quaternary alloy films: (a) broad scan; (b) narrow scan; (c) The lattice constant c of the BeMgZnO quaternary alloy films as a function of the O_2 pressure; (d) The XRD rocking curves of the (002)-plane of BeMgZnO quaternary alloy films

图 2. (a) BeMgZnO 四元合金薄膜的 θ - 2θ 扫描 XRD 全谱图; (b) BeMgZnO 四元合金薄膜的 θ - 2θ 扫描 XRD 窄谱图; (c) BeMgZnO 四元合金薄膜晶格常数 c 随氧压变化的曲线图; (d) BeMgZnO 四元合金薄膜(002) 面的摇摆曲线图

图 2(b) 为 BeMgZnO 四元合金薄膜从 33° 到 36° 的 XRD 窄谱图。由图 2(b) 可以看出, 随着氧压的增大, BeMgZnO 薄膜(002)面的衍射峰位置逐渐向高角度方向移动, 其中 0 Pa 氧压下制备薄膜的衍射峰 2θ 为 34.37° , 4 Pa 氧压下制备薄膜的衍射峰 2θ 为 34.9° 。根据布拉格方程 $2d\sin\theta = n\lambda$ ($n = 1$), 通过代入图 2(b) 中 BeMgZnO 薄膜(002)面的衍射峰 2θ 值, 计算得到不同氧压条件下制备薄膜的晶格常数 c 的值, 如图 2(c) 所示。结果显示, 薄膜的晶格常数 c 随着氧压的增大而逐渐减小, 从氧压为 0 Pa 时的 5.213 \AA 逐渐减小至氧压为 4 Pa 时的 5.138 \AA 。表 1 列出了生长过程中不同氧压条件下制备薄膜的晶格常数 c 的具体数值(纤锌矿 ZnO 晶格常数 $c = 5.23 \text{ \AA}$, 岩盐矿 MgO 晶格常数 $c = 4.216 \text{ \AA}$, 纤锌矿 BeO 晶格常数 $c = 4.24 \text{ \AA}$)。图 2(d) 为不同氧压条件下制备 BeMgZnO 薄膜样品(002)面的摇摆曲线, 其半高宽随着氧压的增大而减小, 在 4 Pa 氧压时摇摆曲线的半高宽达到 1.461° , 表明薄膜沿生长方向原子排列的有序度随着氧压的增大而增大, 在高氧压条件下可以得到面外取向度更高的薄膜样品。表 1 中也列出了不同氧压条件下制备 BeMgZnO 薄膜样品(002)面的摇摆曲线半高宽的具体数值。

图 3 给出了 c 面蓝宝石(113)面和 4 Pa 氧压下生长的 BeMgZnO 四元合金薄膜(103)面的 XRD Φ 扫描图谱。根据图 3 可知蓝宝石衬底为六度对称结构, 而 BeMgZnO 薄膜的 Φ 扫描出现了两套六度对称衍射峰, 其中 BeMgZnO 薄膜(103)面弱峰的峰位与蓝宝石(113)面的峰位一致, 这与 ZnO 薄膜在 c 面蓝宝石上生长时的结果类似, 表明薄膜与蓝宝石衬底间的外延关系为 BeMgZnO(100)//sapphire(110)。BeMgZnO(103)面强峰的峰位与蓝宝石(113)面的峰位相差 30° , 表明此时 BeMgZnO 四元合金薄膜与衬底的外延关系为 BeMgZnO(110)//sapphire(110)。根据上述 θ - 2θ 扫描 XRD 数据(图 2(a))可知, 这些不同氧压条件下生长的 BeMgZnO 四元合金薄膜均为纤锌矿结构的单相薄膜, Φ 扫描中两套六度对称峰的出现可归因为薄膜在面内出现两个相互旋转 30° 的晶畴, 即 BeMgZnO 四元合金薄膜中存在结构取向分离的现象。

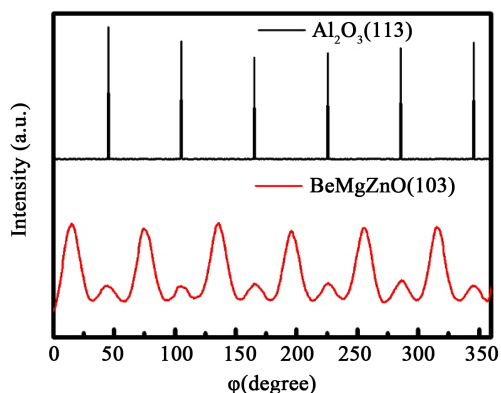


Figure 3. The Phi-scans at sapphire (113) and (103) of the BeMgZnO quaternary alloy film deposited with 4 Pa of oxygen pressure

图 3. 蓝宝石衬底(113)晶面和 4 Pa 氧压条件下制备的四元合金薄膜 BeMgZnO (103)晶面的 Phi 扫描对比分析谱图

Table 1. The composition, lattice constant c , band gap energy, and half width of the rocking curve of BeMgZnO quaternary alloy films

表 1. BeMgZnO 四元合金薄膜的成分、晶格常数 c 、带隙宽度和 XRD 摇摆曲线的半高宽

氧压(Pa)	Be (at %)	Mg (at %)	Zn (at %)	晶格常数 c (Å)	FWHM (°)	带隙宽度(eV)
0	8.31	44.4	47.29	5.213	3.65	4.19
1.2	7.9	44.21	47.89	5.195	2.25	4.16
1.9	6.33	44.79	48.88	5.166	2	4.15
3	6.7	39.05	54.25	5.145	2.08	4
4	3.28	36.28	60.44	5.138	1.46	3.95

图 4(a) 是不同氧压下生长的 BeMgZnO 四元合金薄膜的 XPS 谱图。从图 4(a) 中可以看出薄膜中只有 Be、Mg、Zn、O 四种元素的存在，说明 Be、Mg 共同掺入薄膜的同时并没有引入其它杂质元素。图 4(b) 是在不同氧压条件下生长的 BeMgZnO 薄膜中 Be 元素的 XPS 窄扫描谱图。从图 4(b) 可看出，Be 1s 的峰强很弱，且有随着沉积氧压增大而减弱的趋势。图 4(c) 展示了薄膜中 Be、Mg 含量随沉积氧压改变而变化的曲线。由图可以看出：随着氧压的增大，Be 与 Mg 的含量都呈现减少的总趋势，其中 Be、Mg 含量的微小起伏可能由 XPS 实验测试及后期成分计算误差所造成的。通过 XPS 数据处理得到的 Be 与 Mg 含量具体数值见表 1。由表 1 可以看出，薄膜生长过程中氧压的变化会明显影响 BeMgZnO 四元合金薄膜内各组分的含量，并且各氧压条件下生长 BeMgZnO 薄膜中的 Mg 含量均远高于文献[8]中报道的单相纤锌矿结构 MgZnO 中 Mg 含量的最高限度 33%，表明 Be、Mg 共掺确实有利于提高 Mg 在四元合金中的固溶度。

图 5(a) 为不同氧压条件下生长的 BeMgZnO 薄膜在室温下的透射光谱图。从图中可以看出薄膜在可见光区的透过率良好，均在 85% 以上，且薄膜生长时氧压的变化对薄膜的透过率无明显影响。由于 BeMgZnO 为直接带隙半导体材料[20]，因此其带隙可以基于公式： $(\alpha hv)^2 \propto (hv - E_g)$ 通过线性外推法得到，其中 α 为吸收系数， hv 为光子能量。利用线性外推法得到的不同氧压条件下生长的薄膜样品的带隙宽度如图 5(b) 所示。从图中可以看到，薄膜的光学带隙分布于 3.95 eV~4.19 eV 之间。表 1 列出了各氧压条件下制备的 BeMgZnO 薄膜的带隙宽度值，其中大部分样品的带隙宽度高于文献中报道的 MgZnO 薄膜的最大带隙 3.99 eV [12]，且 BeMgZnO 薄膜的带隙宽度随着氧压的增大而逐渐减小，与其中 Be、Mg 含量的变化

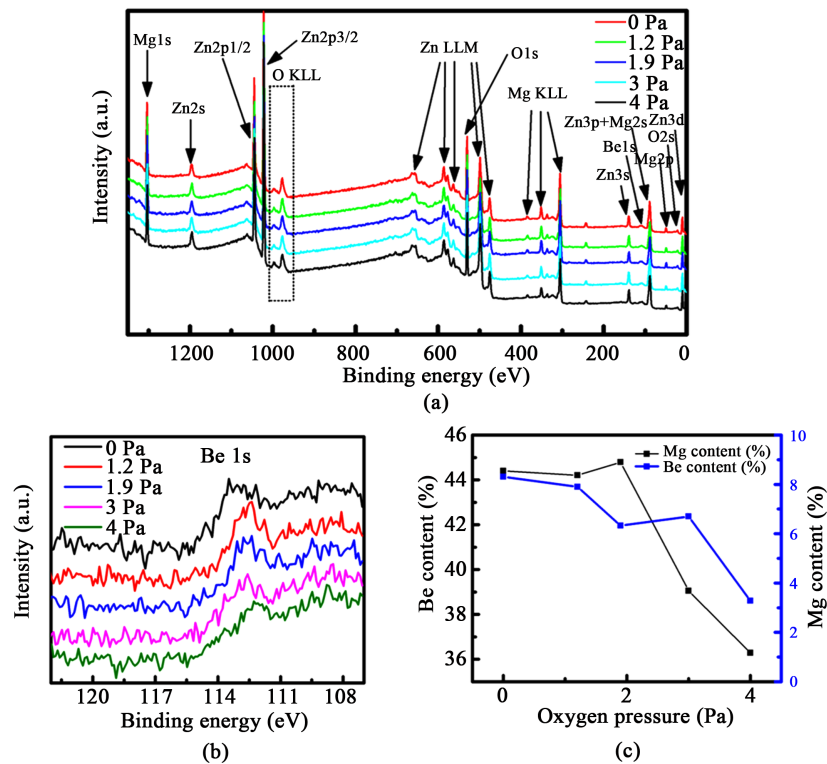


Figure 4. (a) The XPS survey spectra and (b) the Be 1s spectra of BeMgZnO quaternary alloy films; (c) The Be and Mg contents in the BeMgZnO films as a function of the oxygen pressure
图 4. (a) BeMgZnO 四元合金薄膜的 XPS 全谱图; (b) BeMgZnO 四元合金薄膜 Be 1s 的 XPS 窄谱图; (c) BeMgZnO 四元合金薄膜中 Be、Mg 含量随氧压变化曲线图

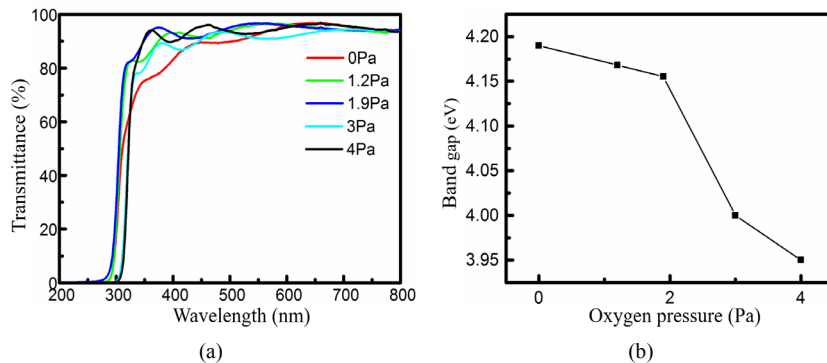


Figure 5. (a) The optical transmittance spectra of BeMgZnO quaternary alloy films; (b) The optical band gaps of the films as a function of the oxygen pressure
图 5. (a) BeMgZnO 四元合金薄膜的 UV-Vis 透射光谱; (b) BeMgZnO 四元合金薄膜的带隙宽度随生长氧压变化趋势图

趋势相符合。在 BeMgZnO 四元合金薄膜中，Be 与 Mg 含量的增多均有拓宽带隙的作用。如图 4(c) 中所示，随着氧压增大，BeMgZnO 四元合金薄膜中 Be 与 Mg 含量均减小，因此其带隙宽度也随之减小。

4. 结论

本研究通过脉冲激光沉积法，以 BeMgZnO 陶瓷作为靶材在 c 面蓝宝石上直接生长出单相的 BeMgZnO 四元合金薄膜，并系统地研究了生长氧压对薄膜结构、成分以及光学带隙的影响。结果表明，

通过 Be-Mg 共取代 ZnO, 不仅有效地提高了 Mg 在纤锌矿结构 ZnO 中的固溶度极限, 同时也提高了合金薄膜的带隙宽度。实验发现, 随着生长薄膜过程中氧压的增高, BeMgZnO 薄膜中的 Be 与 Mg 含量逐渐减小、Zn 的含量随之升高, 而薄膜中 Be、Mg 含量的变化直接导致了合金薄膜晶格常数 c 的减小、薄膜质量的提高以及带隙宽度的减小。

致 谢

感谢国家自然科学基金(61274010, 11574074, 11774082); 湖北省自然科学基金(2015CFA119, 2016AAA031); 武汉国际科技合作项目(2016030409020222)以及材料复合新技术国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金(2018-KF-16)对本工作的支持。

参考文献

- [1] Xu, L.G., Qiu, W., Chen R.F., Zhang, H.M. and Huang, W. (2018) Application of ZnO Electrode Buffer Layer in Perovskite Solar Cells. *Acta Physico-Chimica Sinica*, **34**, 36-48.
- [2] Su, L.X., Zhu, Y., Yong, D.Y., Chen, M.M., Ji, X., Su, Y.Q., Gui, X.C., Pan, B.C., Xiang, R. and Tang, Z.K. (2014) Wide Range Bandgap Modulation Based on ZnO-Based Alloys and Fabrication of Solar Blind UV Detectors with High Rejection Ratio. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**, 14152-14158. <https://doi.org/10.1021/am503427u>
- [3] Özgür, Ü., Alivov, Y.I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M.A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.J. and Morkoç, H. (2005) A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*, **98**, Article ID: 041301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- [4] Lee, C.T. (2010) Fabrication Methods and Luminescent Properties of ZnO Materials for Light-Emitting Diodes. *Materials*, **3**, 2218-2259. <https://doi.org/10.3390/ma3042218>
- [5] Liu, K.W., Sakurai, M. and Aono, M. (2010) ZnO-Based Ultraviolet Photodetectors. *Sensors*, **10**, 8604-8634. <https://doi.org/10.3390/s100908604>
- [6] Yang, J.L., Liu, K.W. and Shen, D.Z. (2017) Recent Progress of ZnMgO Ultraviolet Photodetector. *Chinese Physics B*, **26**, Article ID: 047308. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/4/047308>
- [7] Zhang, L., Li, L., Wang, L.H., Li, L.K., Lu, Y.M., Meyer, B.K. and He, Y.B. (2014) Tuning the Composition and Optical Band Gap of Pulsed Laser Deposited ZnO_{1-x}S_x Alloy Films by Controlling the Substrate Temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, **617**, 413-417. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.024>
- [8] Zheng, L.L., Lin, Y.Y., Li, L., Liang, G.J., Li, M.K., Li, P. and He, Y.B. (2015) Structural Properties and Enhanced Bandgap Tunability of Quaternary CdZnOS Epitaxial Films Grown by Pulsed Laser Deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, **650**, 748-752. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.049>
- [9] He, Y.B., Cheng, H.L., Tai, J.L., Li, L., Zhang, L., Li, M.K., Lu, Y.M., Zhang, W. and Meyer, B.K. (2015) Single-Phase Quaternary Mg_xZn_{1-x}O_{1-y}S_y Alloy Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition. *Journal of Applied Physics*, **117**, Article ID: 065301. <https://doi.org/10.1063/1.4907785>
- [10] Zhang, W.Z., Xu, M.J., Zhang, M., Cheng, H.L., Li, M.K., Zhang, Q.F., Lu, Y.M., Chen, J.W., Chen, C.Q. and He, Y.B. (2018) Pulsed Laser Deposited Be_xZn_{1-x}O_{1-y}S_y Quaternary Alloy Films: Structure, Composition, and Band Gap Bowing. *Applied Surface Science*, **433**, 674-679. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.068>
- [11] Ghosh, R. and Basak, D. (2007) Composition Dependent Ultraviolet Photoresponse in Mg_xZn_{1-x}O Thin Films. *Journal of Applied Physics*, **101**, Article ID: 113111. <https://doi.org/10.1063/1.2743887>
- [12] Ohtomo, A., Kawasaki, M., Koida, T., Masubuchi, K., Koinuma, H., Sakurai, Y., Yoshida, Y., Yasuda, Y. and Segawa, Y. (1998) Mg_xZn_{1-x}O as a II-VI Widegap Semiconductor Alloy. *Applied Physics Letters*, **72**, 2466-2468. <https://doi.org/10.1063/1.121384>
- [13] Su, X.Y., Si, P.P., Hou, Q.Y., Kong, X.L. and Cheng, W. (2009) First-Principles Study on the Bandgap Modulation of Be and Mg Co-Doped ZnO Systems. *Physica B: Condensed Matter*, **404**, 1794-1798. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.02.021>
- [14] Zhu, Y., Su, L.X., Chen, M.M., Su, Y.Q., Ji, X., Gui, X.C. and Tang, Z.K. (2015) Controlled Growth of Epitaxial Wurtzite BeMgZnO Alloy Films and Two Microscopic Origins of Be-Mg Mutual Stabilizing Mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*, **631**, 355-359. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.173>
- [15] Vettumperumal, R., Kalyanaraman, S. and Thangavel, R. (2013) Nanocrystalline Zn_{1-x-y}Be_xMg_yO Thin Films Synthesized by the Sol-Gel Method: Structural and Near Infrared Photoluminescence Properties. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **68**, 334-440. <https://doi.org/10.1007/s10971-013-3174-7>

- [16] Ullah, M.B., Ding, K., Nakagawara, T., Avrutin, V., Ozgur, U. and Morkoc, H. (2018) Characterization of Ag Schottky Barriers on $\text{Be}_{0.02}\text{Mg}_{0.26}\text{ZnO}/\text{ZnO}$ Heterostructures. *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, **12**, Article ID: 1700366. <https://doi.org/10.1002/pssr.201700366>
- [17] Ding, K., Ullah, M.B., Avrutin, V., Ozgur, U. and Morkoc, H. (2017) Investigation of High Density Two-Dimensional Electron Gas in Zn-Polar $\text{BeMgZnO}/\text{ZnO}$ Heterostructures. *Applied Physics Letters*, **111**, Article ID: 182101. <https://doi.org/10.1063/1.4993853>
- [18] Toporkov, M., Ullah, M.B., Demchenko, D.O., Avrutin, V., Morkoç, H. and Özgür, Ü. (2017) Effect of Oxygen-to-Metal Flux Ratio on Incorporation of Metal Species into Quaternary BeMgZnO Grown by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, **467**, 145-149. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2017.03.028>
- [19] Chen, S.S., Pan, X.H., Li, Y.G., Chen, W., Zhang, H.H., Dai, W., Ding, P., Huang, J.Y., Lu, B. and Ye, Z.Z. (2015) Improved Photoluminescence Performance of MgZnO Films by Alloying Beryllium. *Physics Letters A*, **379**, 912-915. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2015.01.009>
- [20] Toporkov, M., Avrutin, V., Okur, S., Izyumskaya, N., emchenko, D.D., Volk, J., Smith, D.J., Morkoç, H. and Özgür, Ü. (2014) Enhancement of Be and Mg Incorporation in Wurtzite Quaternary BeMgZnO Alloys with up to 5.1 eV Optical Bandgap. *Journal of Crystal Growth*, **402**, 60-64. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.04.028>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ms@hanspub.org