



新型二维强关联材料与微纳 器件的研究

李京波

半导体超晶格国家重点实验室

中国科学院半导体研究所

2014年2月27日





汇报内容

1. 研究背景。
2. 已取得研究成果。
3. 实验进展。
4. 未来研究计划。
5. 致谢





李京波小组研究特色

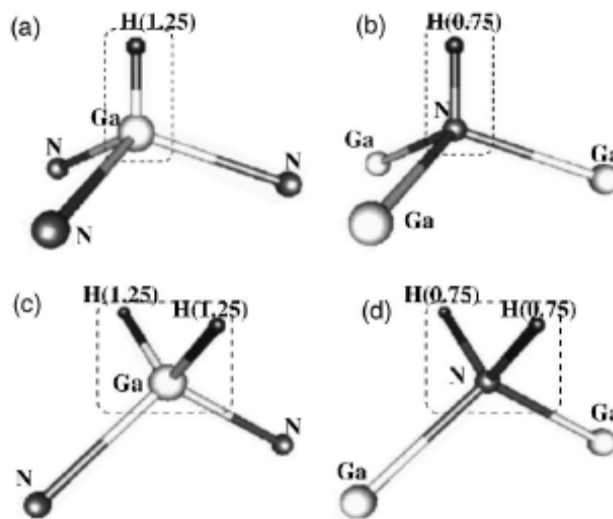
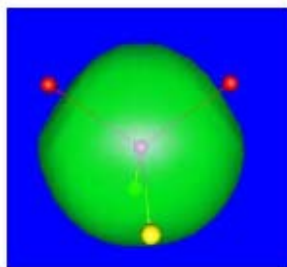
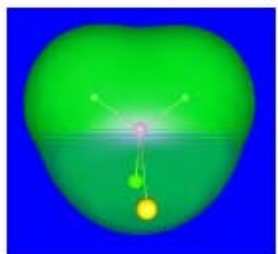
本研究小组的特点是：一方面抓住半导体发展的前沿方向（如“新型二维半导体光电信息功能材料与器件”和“自旋电子学”等），另一方面以国家重大需求为背景，如针对国家提出“节能减排”，开发高亮度高效率蓝光LED芯片，密切结合与“固态照明”相关材料、器件中的本质物理问题，试图在理论上找出一条解决的途径，如宽禁带半导体p型掺杂问题。

2010年9月，李京波团队与浙江东晶电子股份有限公司（上市公司，股票代码002199）合作，总投资30亿元。已经在蓝宝石单晶生长、GaN外延、蓝光LED芯片产业化项目取得很好的进展。

用第一性原理方法计算上百万原子系统的能级和波函数

“电荷复制方法” (Charge Patching Method)

- 第一步：对一个小单元进行自洽LDA计算，得到每个键的电荷图形 (motif)。
- 第二步：用“电荷复制方法”得到整个大系统的电荷密度。
- 第三步：求解“泊松方程”得到电势，用“折叠谱方法”求系统的本征能量和波函数。

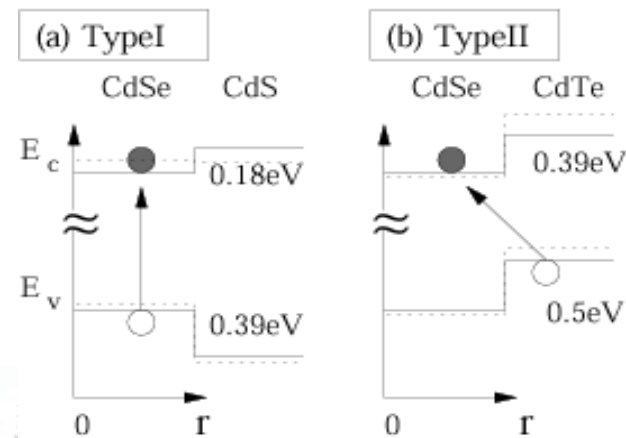
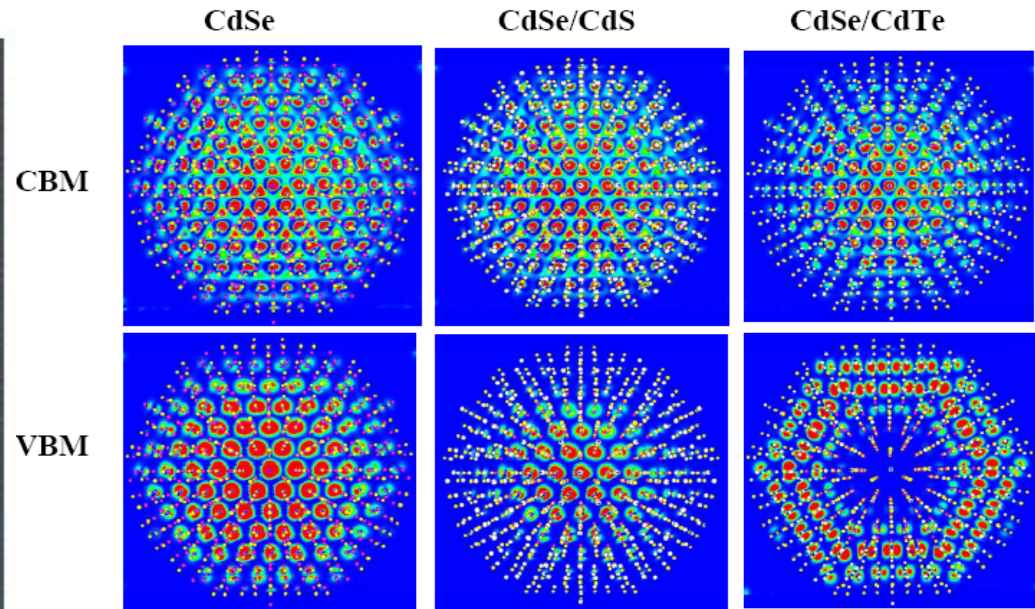
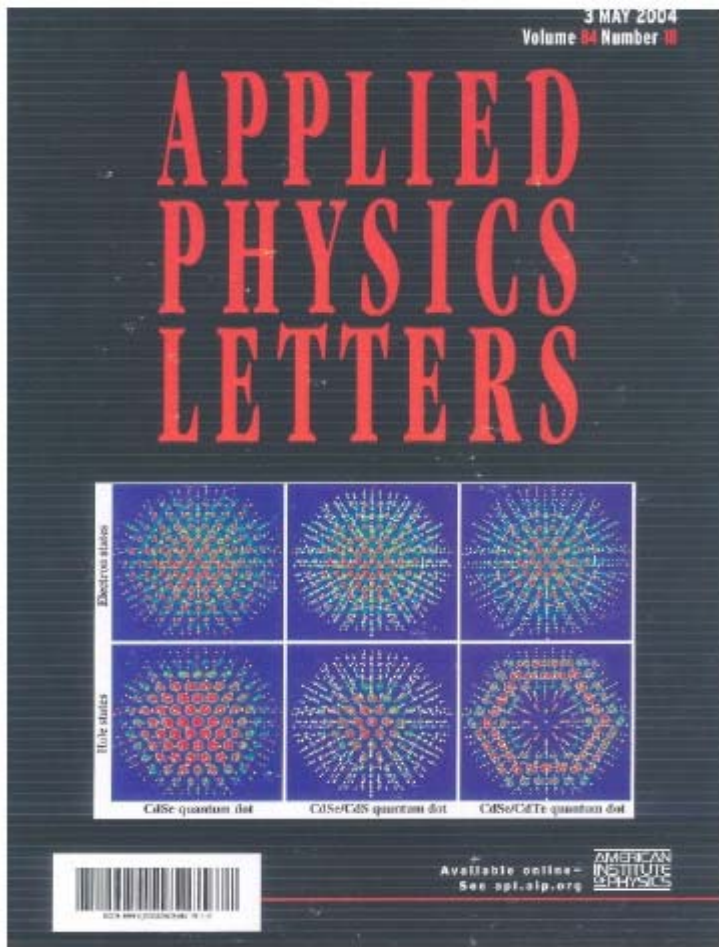


用氢原子钝化Ga和N的表面

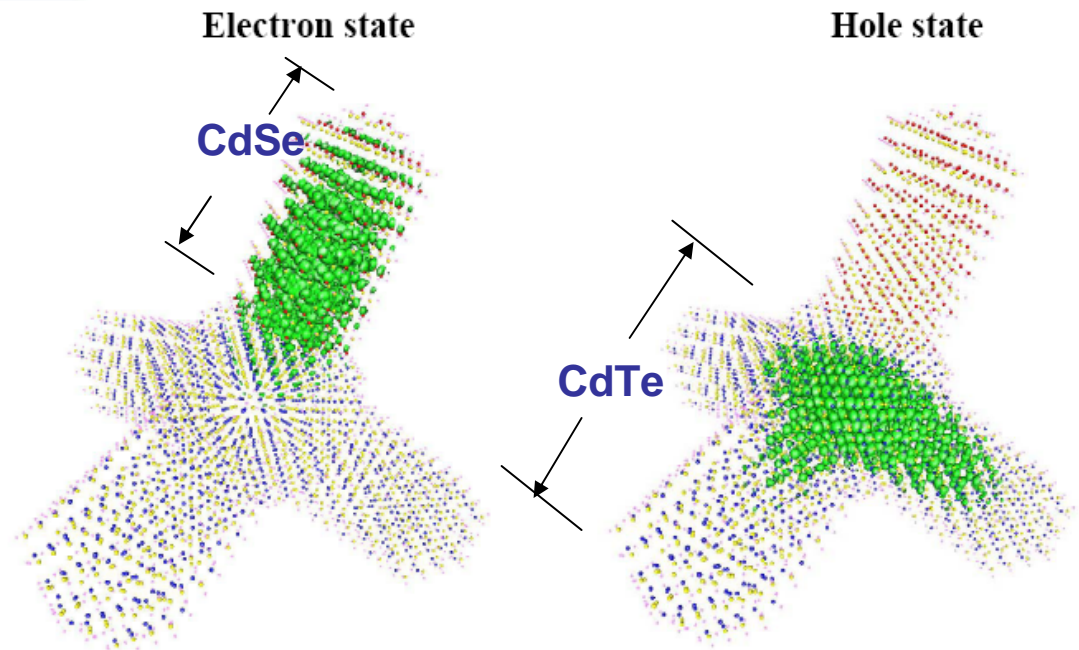
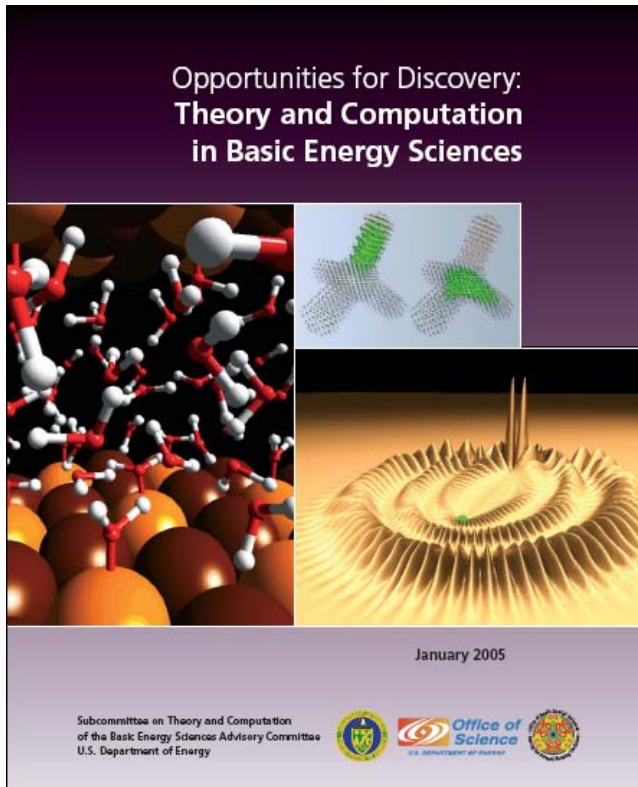
L.-W.Wang, PRL.88,256402(2002)

Jingbo Li and L.-W Wang, PRB 72, 125325(2005)

核/壳结构量子点的电子态

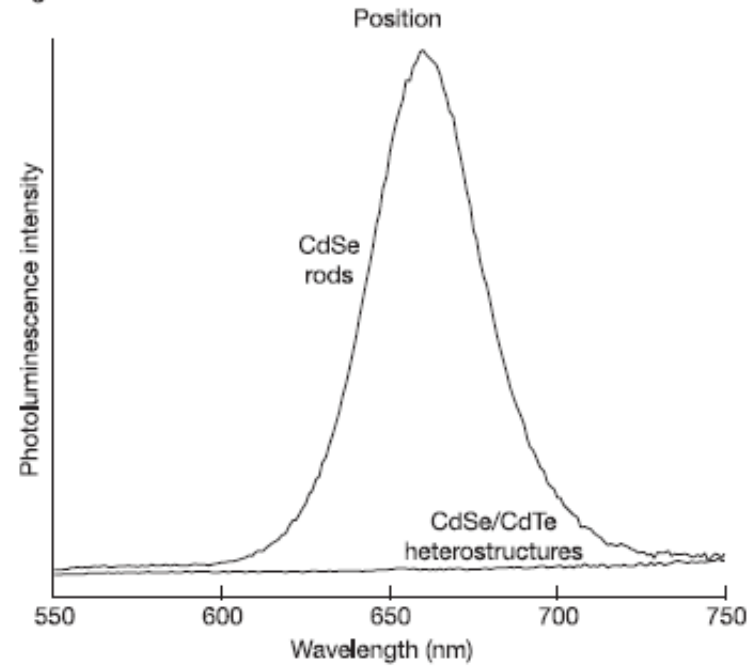
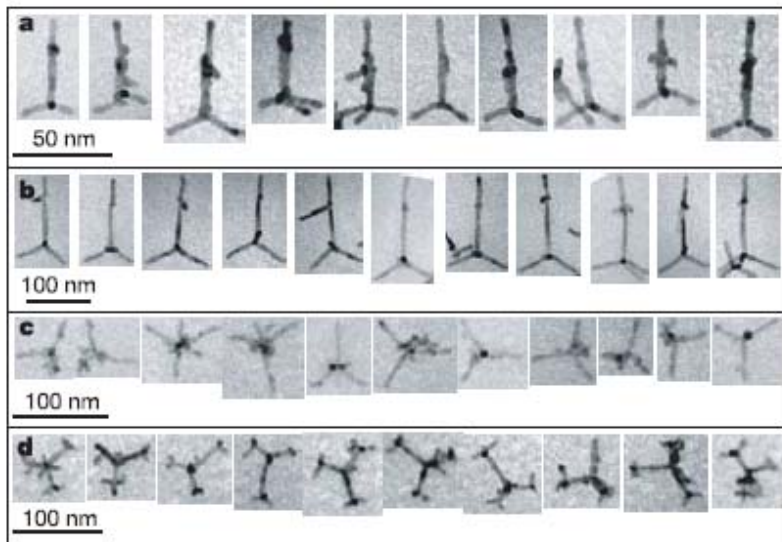
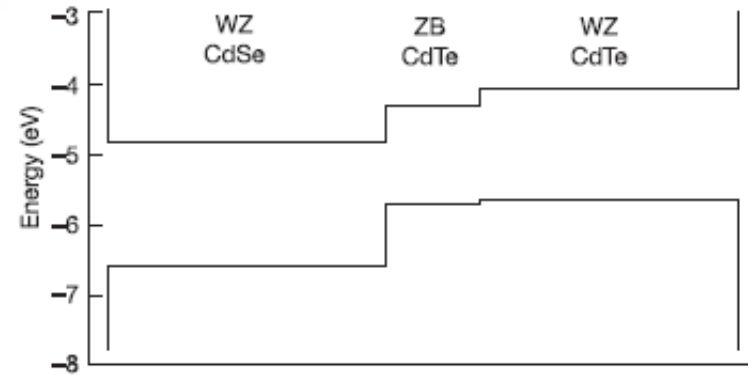
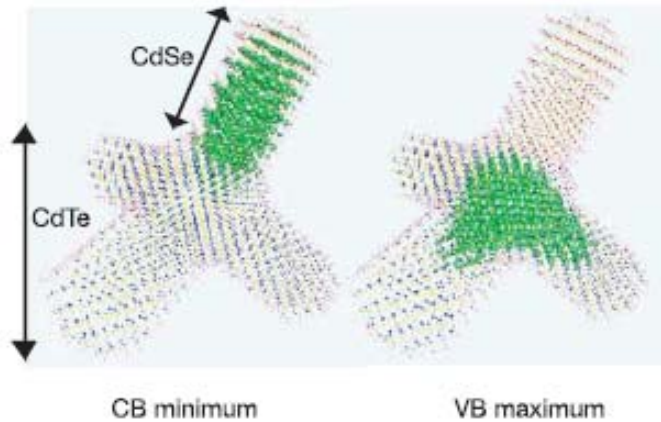


CdSe/CdTe 四角结构 (tetrapod) 的复杂量子点



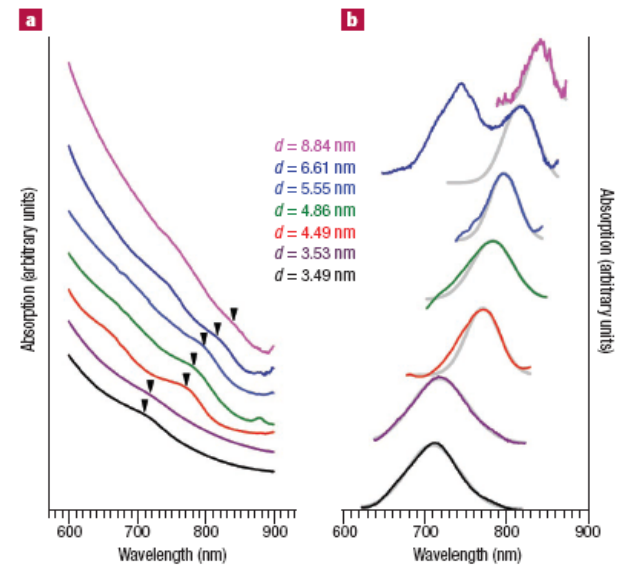
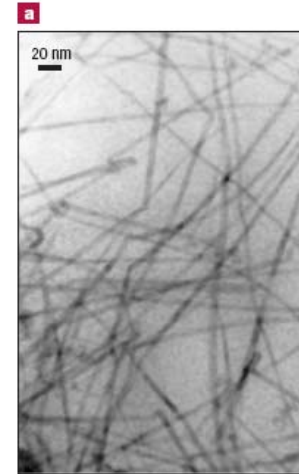
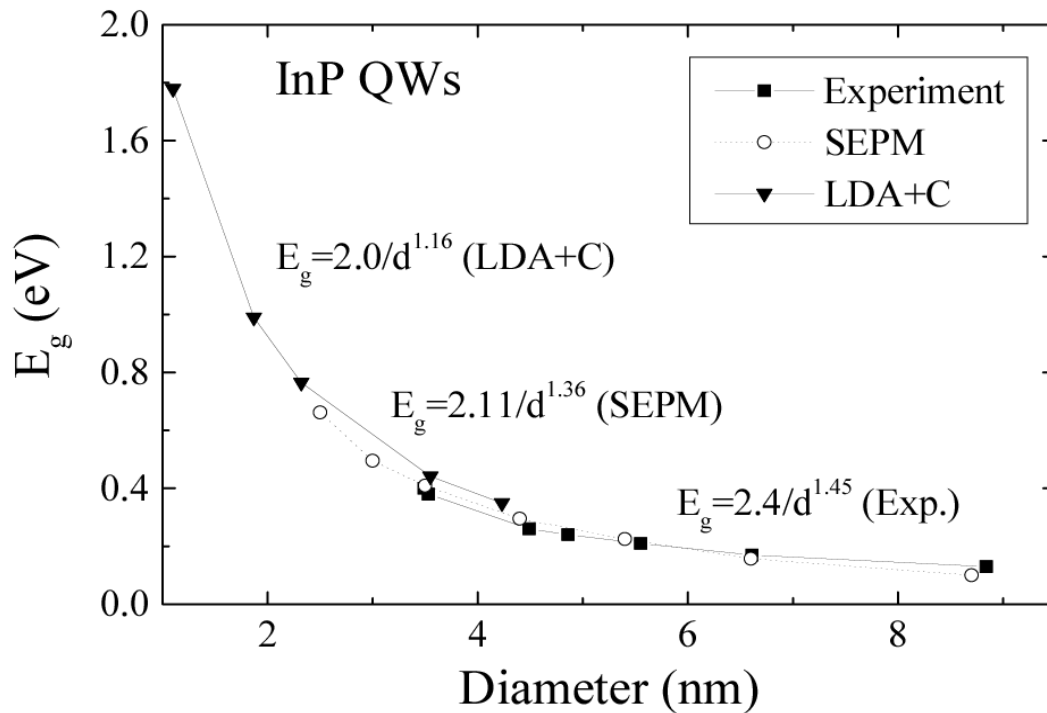
D. J. Milliron, S. M. Hughes, Yi Cui, L. Manna, **Jingbo Li**, L. W. Wang and A. P. Alivisatos, *Nature* 430, 190 (2004).

CdSe/CdTe 四角结构 (tetrapod) 的复杂量子点



D. J. Milliron, S. M. Hughes, Yi Cui, L. Manna, **Jingbo Li**, L. W. Wang and A. P. Alivisatos, *Nature* 430, 190,(2004).

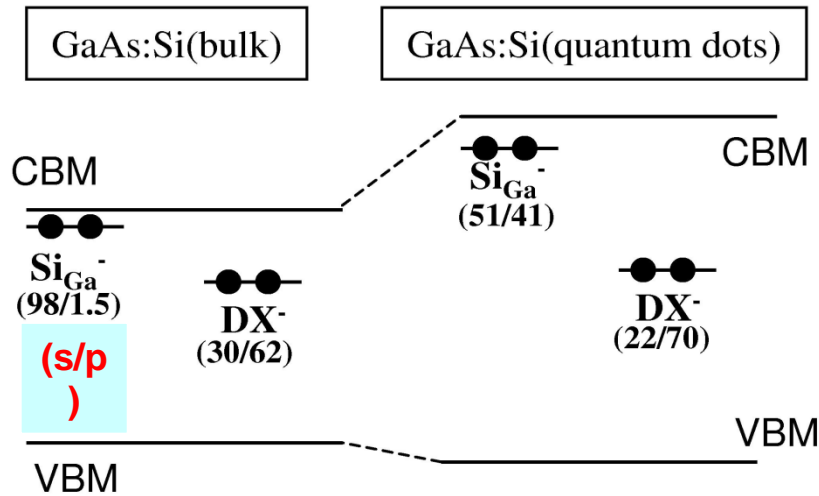
不同尺寸 InP 量子线的带隙



Jingbo Li and L.-W Wang, PRB 72, 125325(2005)

H.Yu, Jingbo Li, R. A. Loomis, L.W. Wang, and W. E. Buhro, Nature Material, 2,517(2003)

Si-掺杂的GaAs量子点中将形成 DX 深能级中心

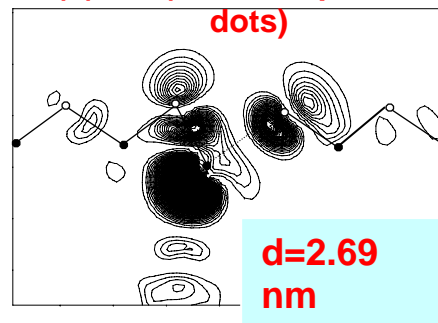
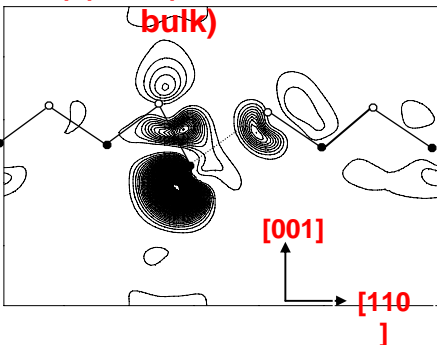


➤量子点导带能级（CBM）随体积减小而上升，浅杂质能级 Si_{Ga}^- 随带边移动而移动。

➤DX深能级中心不随带边移动而相对变得更深。

(a) DX^- (GaAs:Si bulk)

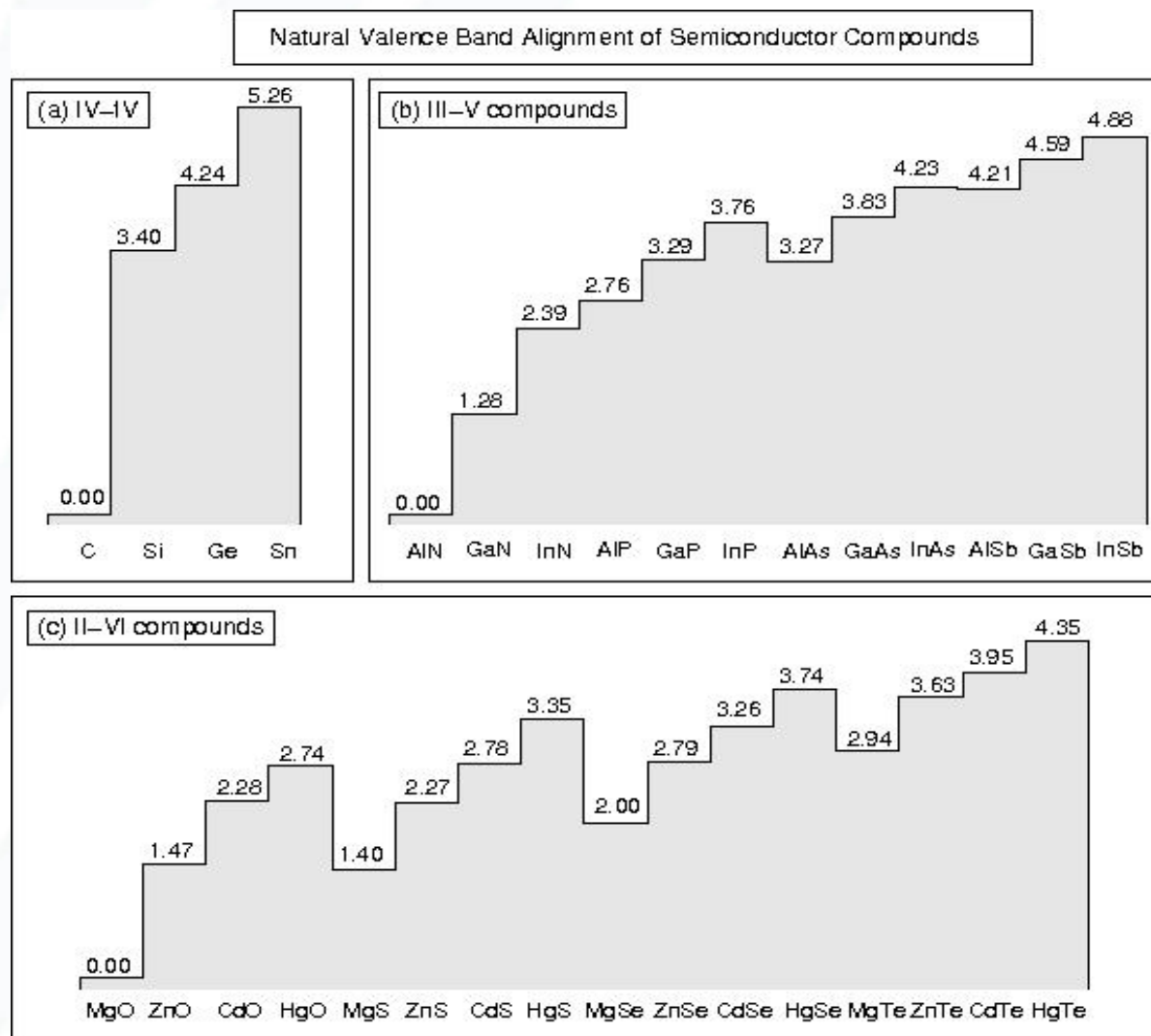
(b) DX^- (GaAs:Si quantum dots)



意味着未来纳米器件将出现新的挑战！

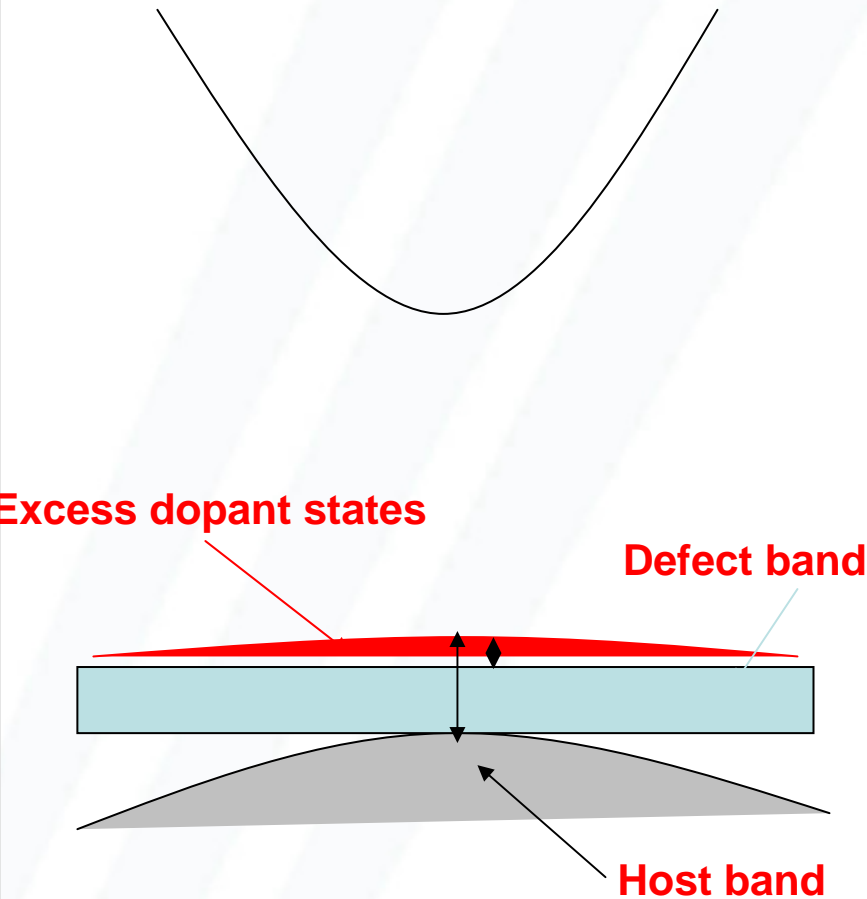
Jingbo Li and S.-H. Wei, Phys. Rev. Lett. 94, 185501 (2005)

为什么宽禁带半导体材料很难实现p-型掺杂？



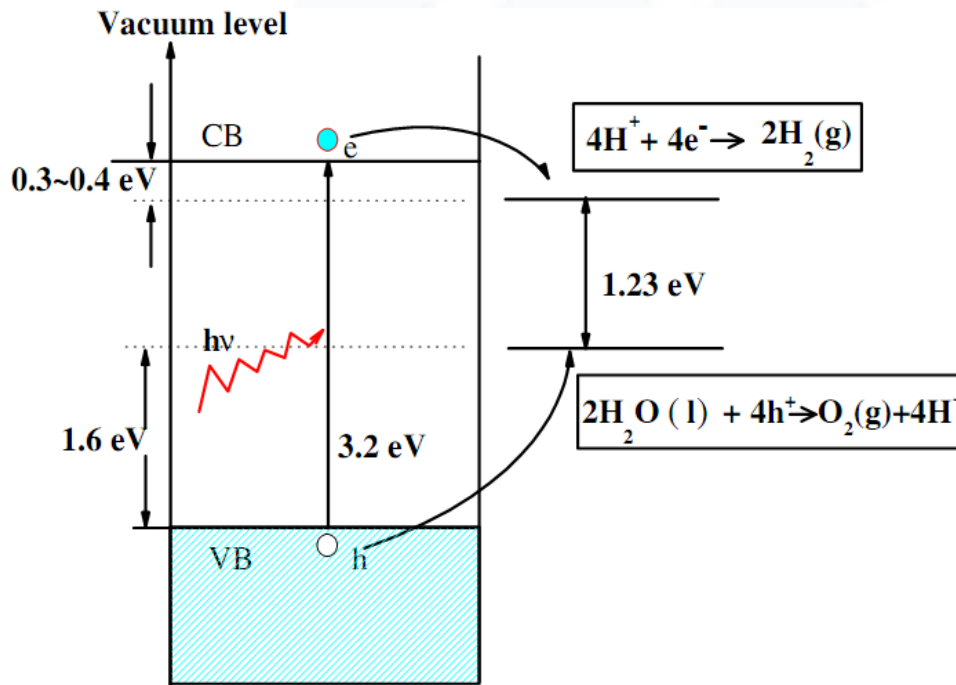
S.H.Weï and A. Zunger, App. Phys. Lett. 72,2011 (1998).

通过形成杂质能带以降低受主离化能



- 首先：采用诸如Ga-N共掺杂等方法在价带上方构造钝化的缺陷能带。
- 充分补偿之后，过量的受主杂质将在这一钝化缺陷带上方形成受主态，其离化方式将由向价带跃迁改为向该钝化带跃迁，所需离化能大大降低

如何提高TiO₂的光催化效率?



◆采用补偿的施、受主共掺杂的方法，对TiO₂进行能带“剪裁”。

◆ Mo+C 共掺杂到TiO₂中，能够在满足带隙要求的同时，保证材料的价带顶位置向高能方向移动，而导带底位置几乎不变。

◆这种补偿的共掺杂的方法消除了由单独掺杂所引入的载流子复合中心，提高了光生载流子的寿命。

Y. Gai, Jingbo Li*, S.S.Li, J.B.Xia, S.H.Wei* Phys. Rev. Lett. 102, 036402 (2009).

2009年以来被他引201次
被选为2009年我国在国际上最有影响的百篇学术论文



Nature (Asia Materials): featured Highlight

Website: <http://www.natureasia.com/asia-materials/highlight.php?id=408>



home » current content » featured highlight » Green energy: Tailor made catalysts

featured highlight

Green energy: Tailor made catalysts

Published online 17 March 2009

Titanium dioxide (TiO_2) catalysts are widely used for producing hydrogen gas for fuel cells. TiO_2 is a photoactive material that converts sunlight into electronic charge, and then uses these charges to electrochemically split water into hydrogen and oxygen gas. Now, Jingbo LI and colleagues at the Chinese Academy of Science in Beijing and collaborators in the USA have designed a way to enhance TiO_2 catalytic efficiency by doping the crystal

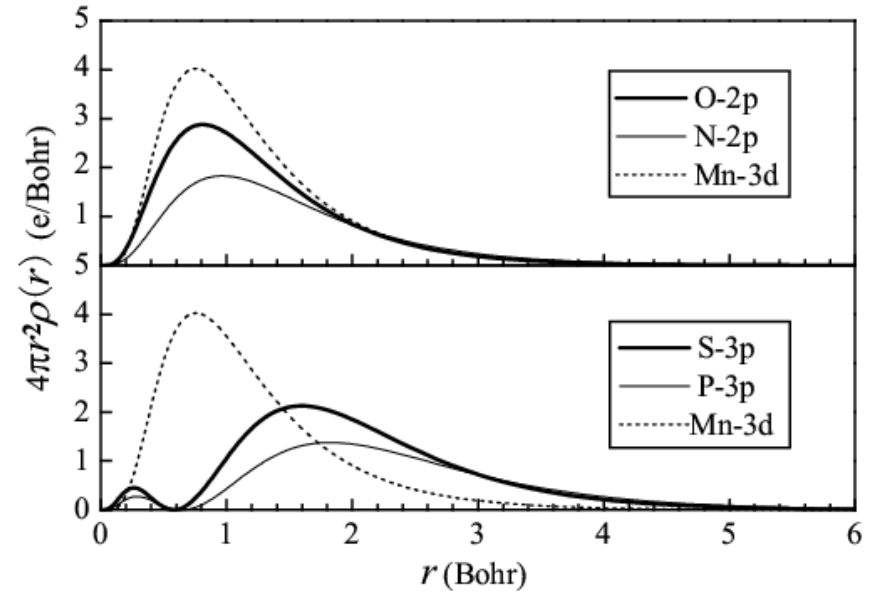
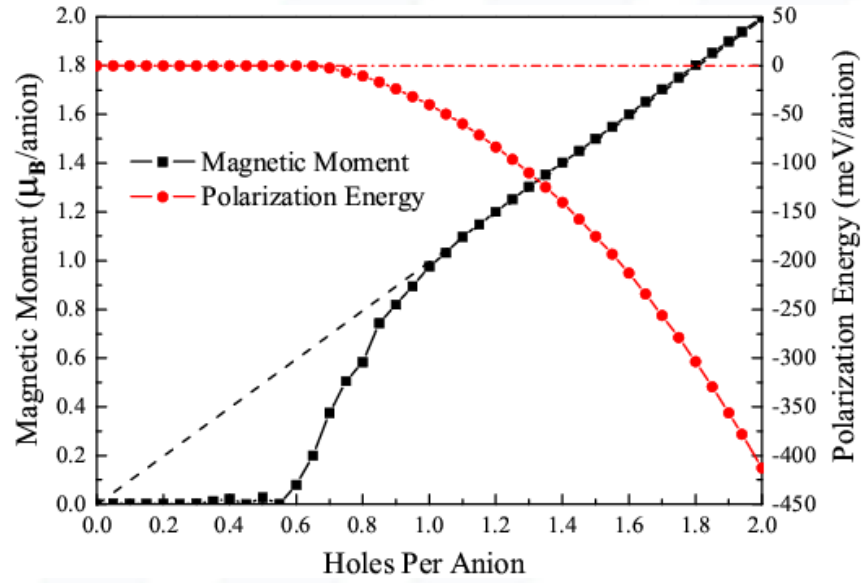


李京波 和美国合作者设计了一种方法来增强 TiO_2 的光催化效率……



空穴注入引起半导体铁磁性的物理机制

为什么在 ZnO 和 GaN 中不掺入磁性原子也同样具有铁磁性呢？



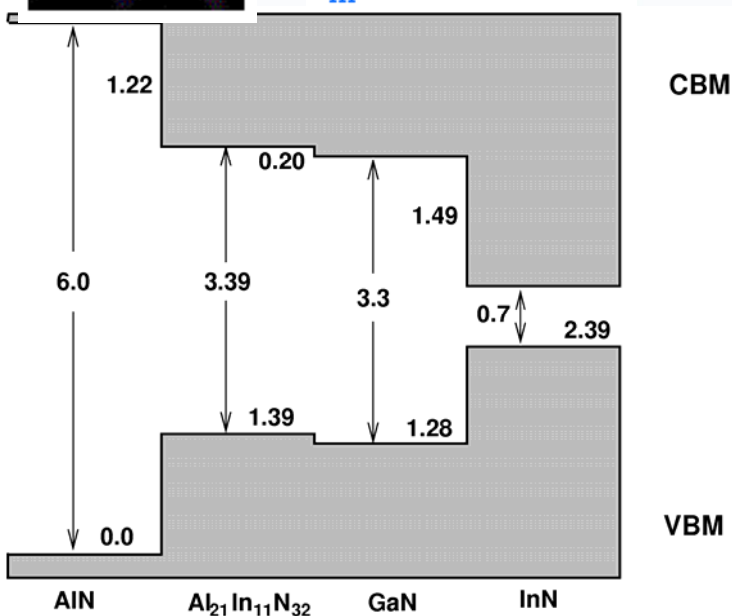
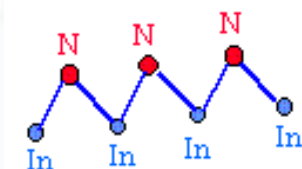
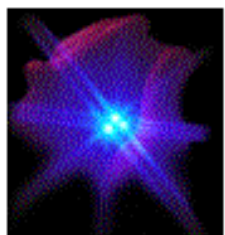
空穴注入ZnO的磁矩和自旋极化能量

N, O, P, 和S 的价电子 p-轨道波函数分布与 Mn的 3d-轨道的比较.

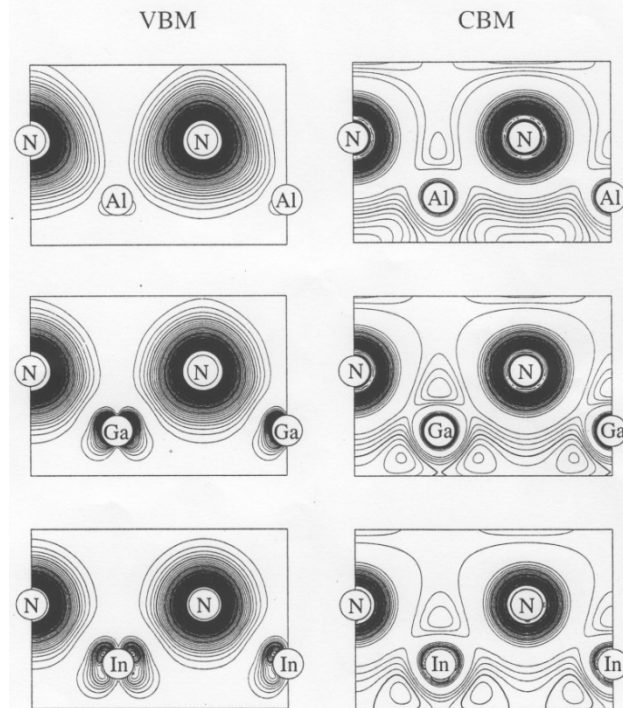
H. Peng, H.J.Xiang, S.H.Wei*, S.S.Li, J.B.Xia, **Jingbo Li,*** Phys. Rev. Lett. 102, 017201 (2009).

2009年以来被他引145次
被选为2009年我国在国际上最有影响的百篇学术论文

AlGaInN 四元合金比 GaN 更容易实现 p-型掺杂和更强的发光性质



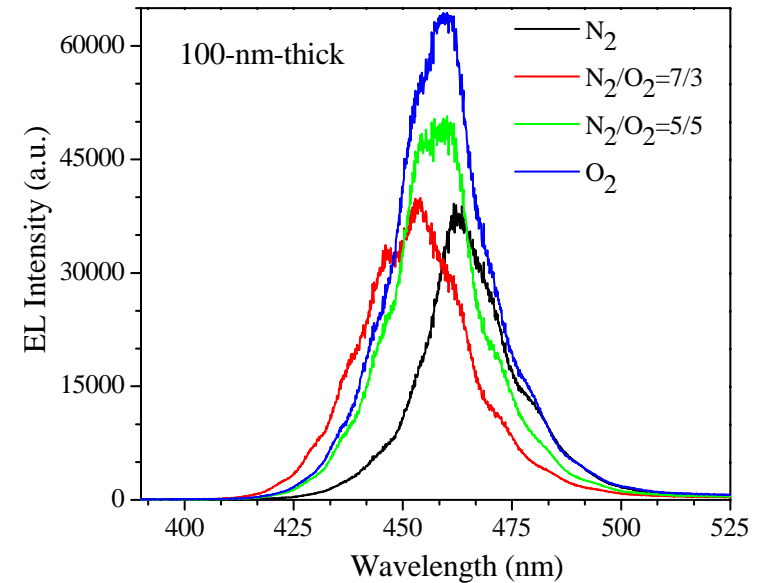
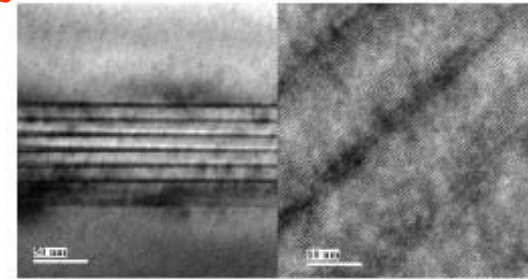
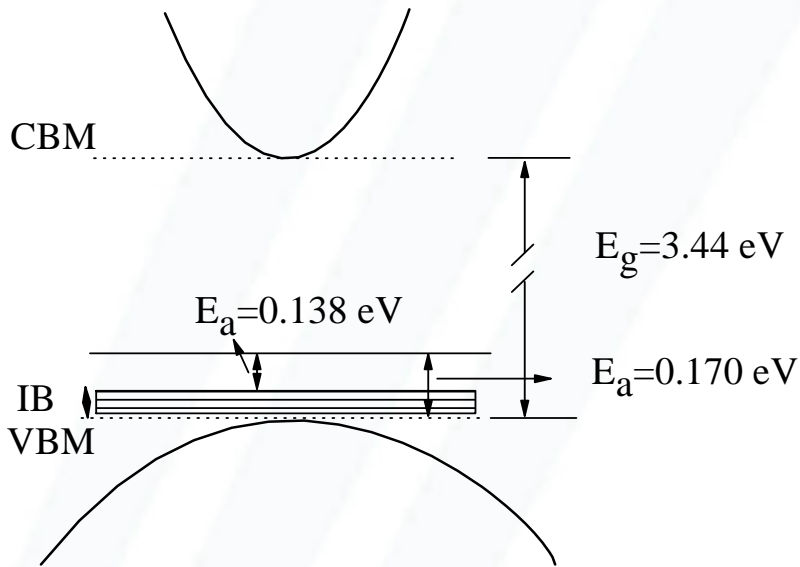
Band Edge Charge Density



同时导带底和价带顶的波函数局域于 InN 之中，所以光跃迁矩阵元增强，从而发光增强。

AlInGaN 四元合金比 GaN 有更高的价带顶 (VBM)，所以 p-型掺杂效率更高。

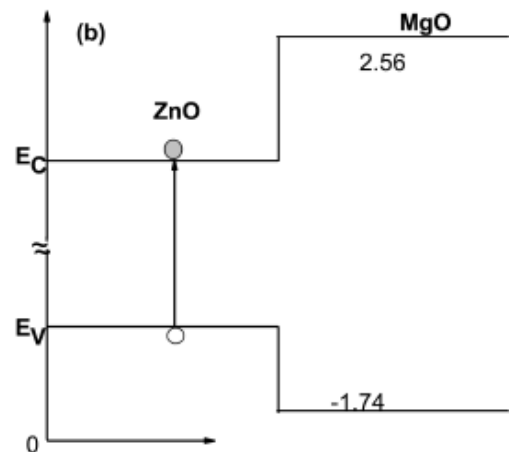
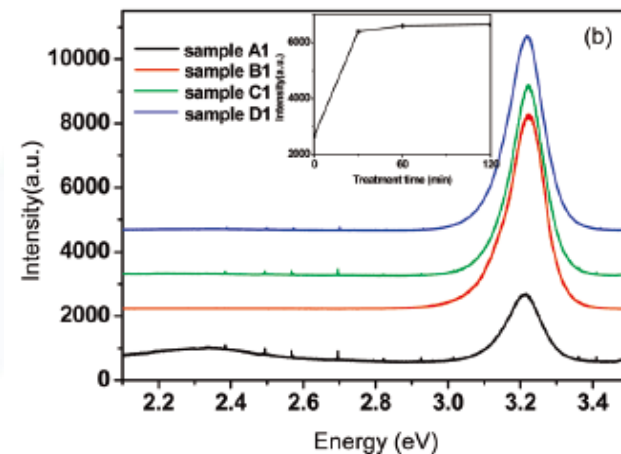
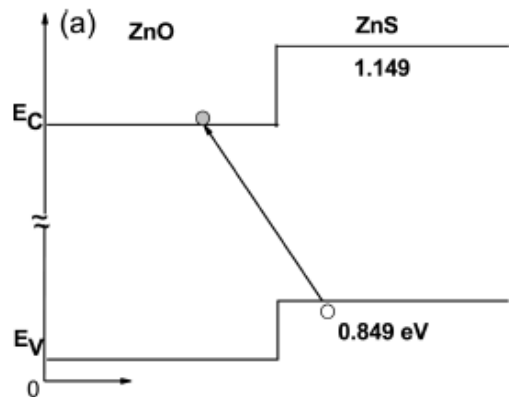
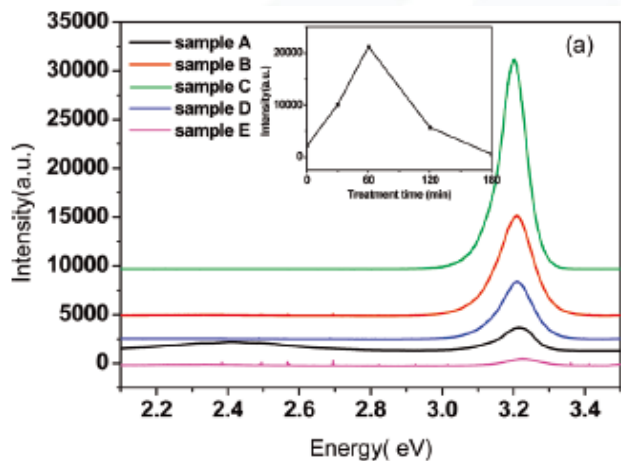
GaN/InGaN多量子阱LED在氧气 中退火的发光特性



提高GaN的p-型掺杂效率

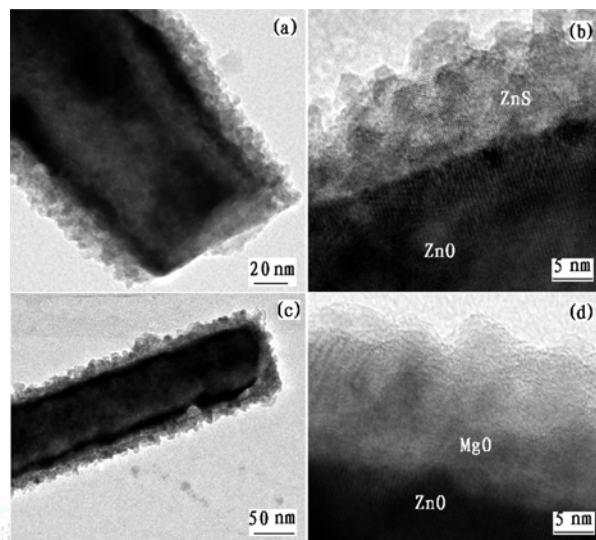
P. Ma, Y. Q. Gai, J. Wang, F. Yang, Y. Zeng, Jinmin Li, **Jingbo Li,***
Appl. Phys. Lett. 93, 102112 (2008).

壳层 ZnS, MgO 对芯 ZnO 纳米线阵列 PL 特征的影响

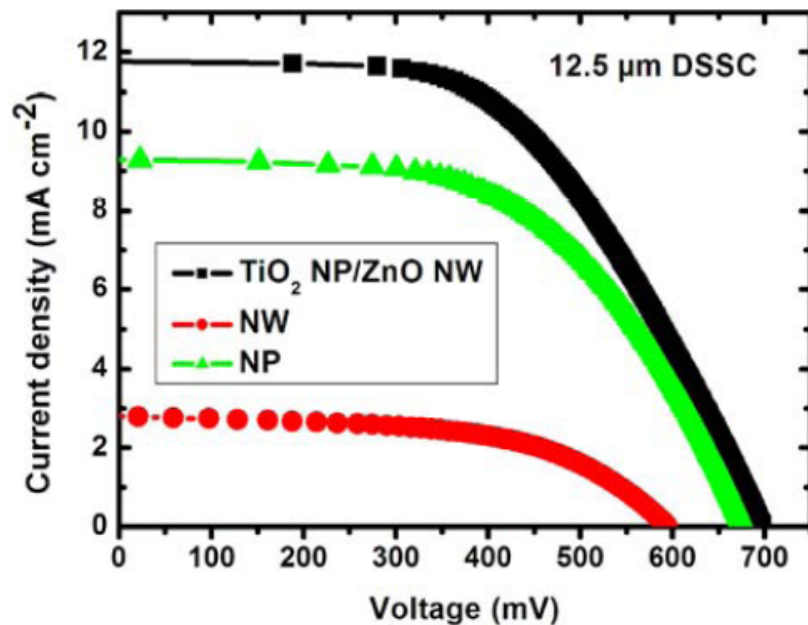
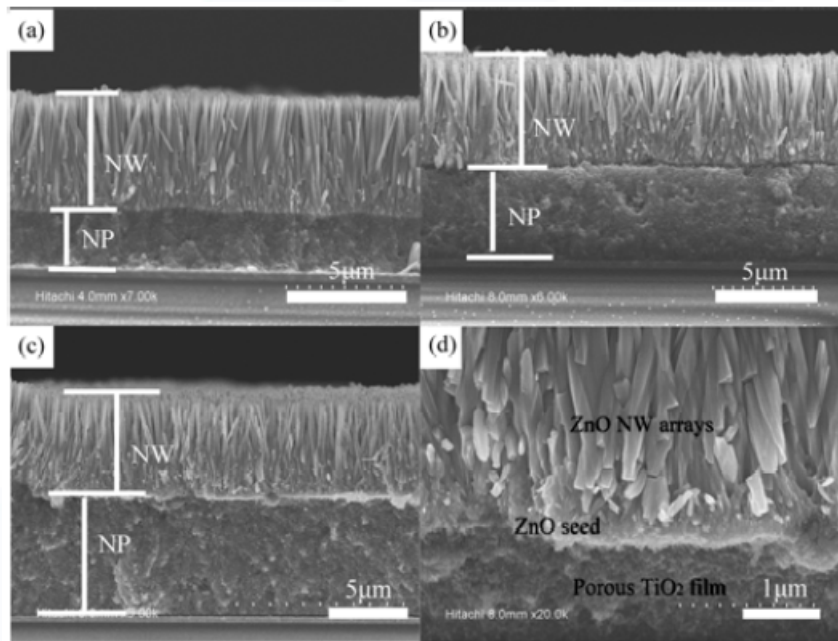


◆ ZnO/ZnS 显著改变 PL 特征，因为壳层把电子和空穴空间分离

◆ ZnO/MgO 几乎不改变 PL 特征，因为电子和空穴没有空间分离，壳层起饱和和悬键作用



ZnO纳米线涂层TiO₂纳米颗粒染料敏化太阳能电池



- ◆ TiO₂纳米颗粒具有大的表面积，提供有效的染料吸附
- ◆ ZnO纳米线层有利于光生电子的转移和收集
- ◆ 电池效率可达4.52%，优于ZnO纳米线和TiO₂纳米粒

Meili Wang, Yan Wang, Jingbo Li*, *Chem. Commun.* 47, 11246 (2011)

Why 2D Materials Are So Interesting?-Graphene

石墨烯的优异性能

高的力学强度（钢的100倍）

杨氏模量： $\sim 1,100$ Gpa

断裂强度： ~ 125 GPa

高透明性： $\sim 97.7\%$

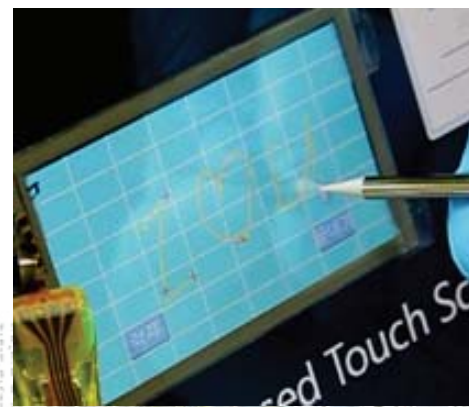
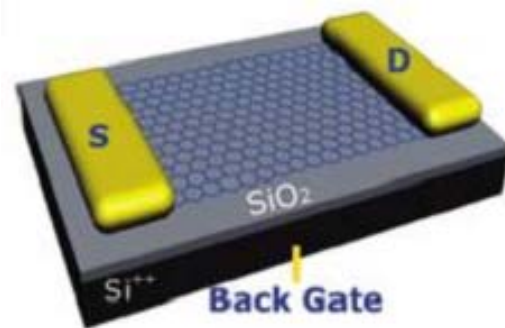
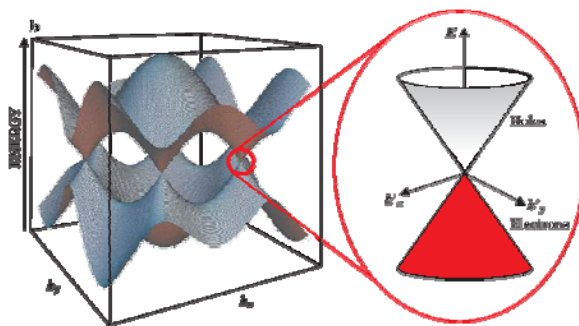
高比表面积： ~ 2630 m²g⁻¹

高热导率： ~ 5000 Wm⁻¹K⁻¹，铜的10倍

高载流子浓度： 10^{13} cm⁻¹

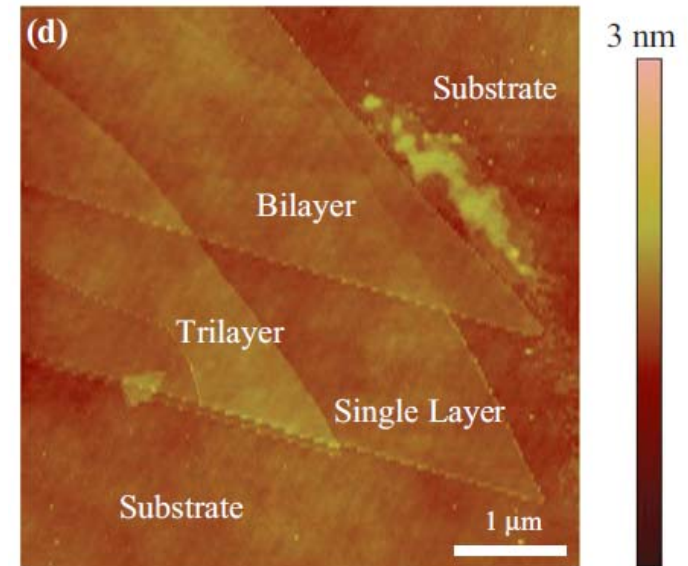
高载流子迁移率： $200,000$ cm²V⁻¹s⁻¹（
硅的100倍）

高截止频率（ >400 GHz）



Graphene— Mechanical Exfoliation

- Mechanical exfoliation. Cheap&Fast, can be used for almost any layered materials.
- Not every material can be exfoliated to monolayer/few layer thick.
- Typically the thin flakes are so small that micro/nano scale electrodes are necessary for measurements.

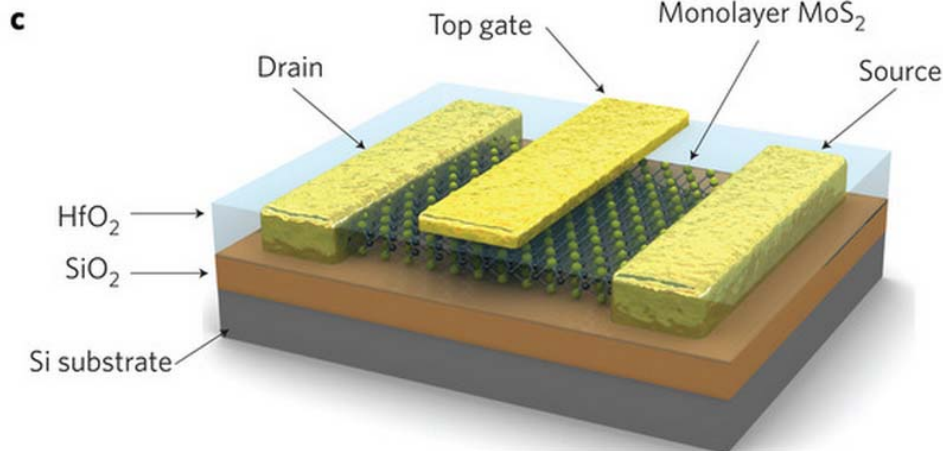


Materials Beyond Graphene— MoS₂

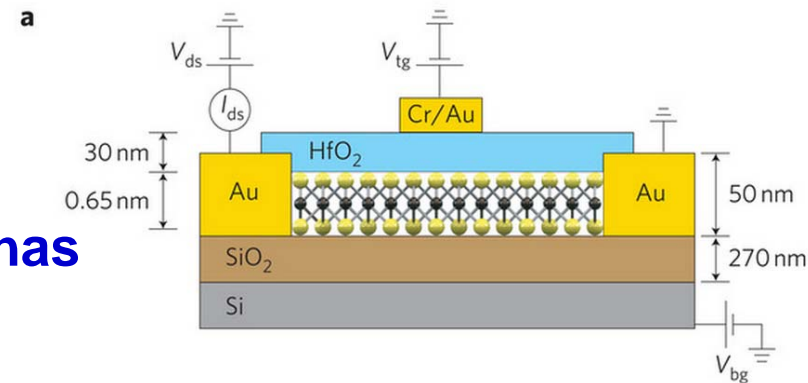
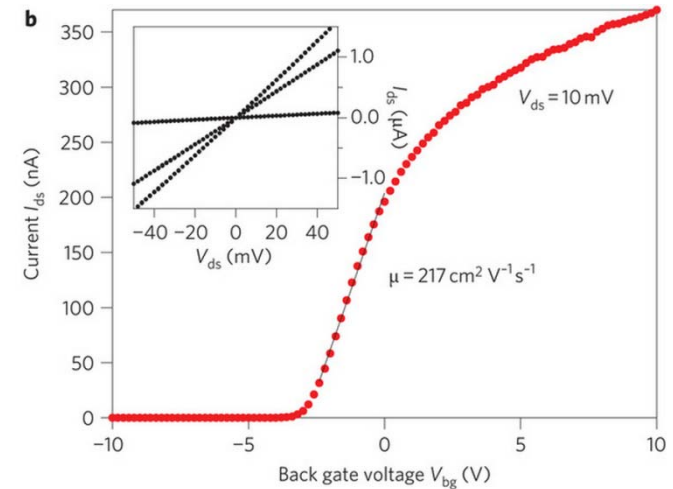
nature
nanotechnology

Single-layer MoS₂ transistors

B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti & A. Kis



200 cm²/SV mobility and 10⁸ on/off ratio has been demonstrated!



This paper has been cited 678 times in three years!

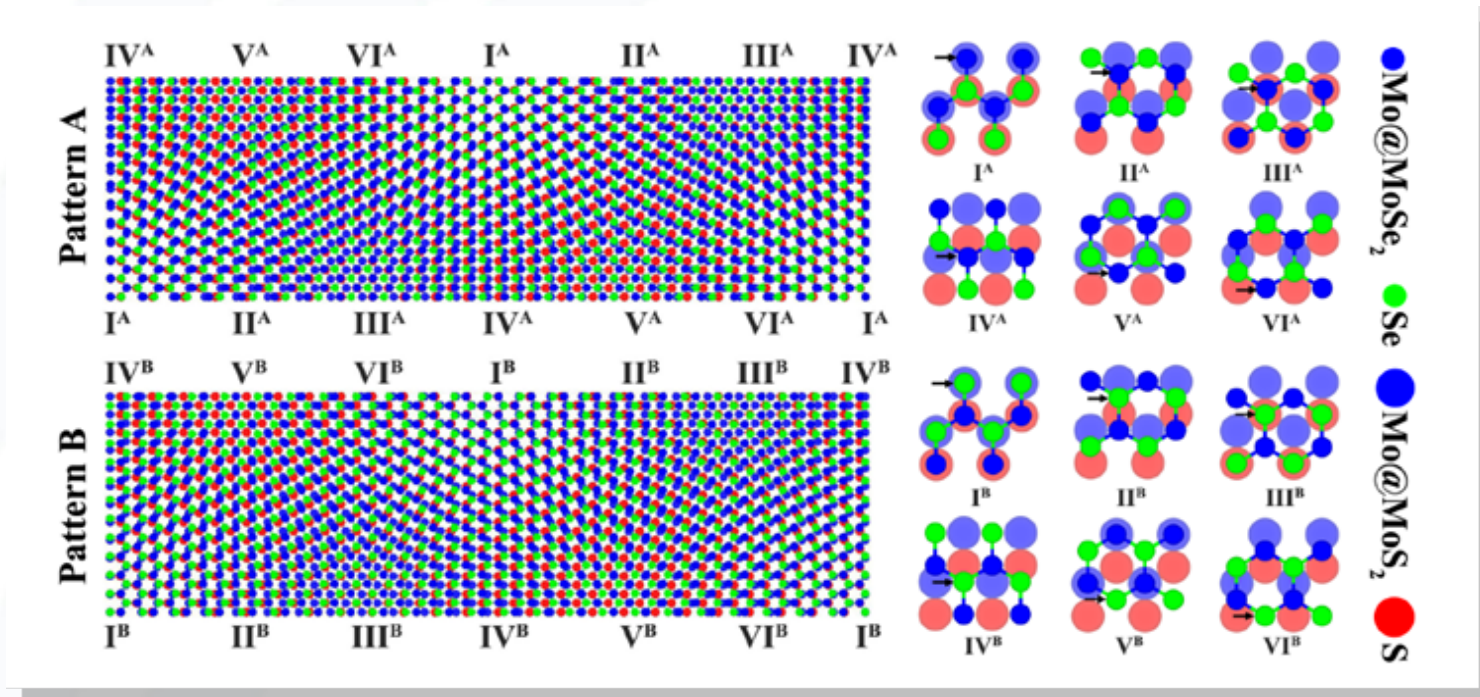
Nature Nanotechnology 6, 147 (2011)

Why 2D Materials Are So Interesting?

- **Electronic band structure transition– direct/indirect band transition in MoS_2 .**
- **Large surface area, properties can be strongly affected by the substrate and the environment, e.g. sensing.**
- **Reduced dimensionality– enhanced electron/electron correlation, e.g. Superconductivity in 2D materials.**
- **Carrier concentration in the material can be effectively modulated by solid state/ ionic liquid gating.**



二维单层 $\text{MoS}_2/\text{MoSe}_2$ 的异质结形成莫氏图案的成因

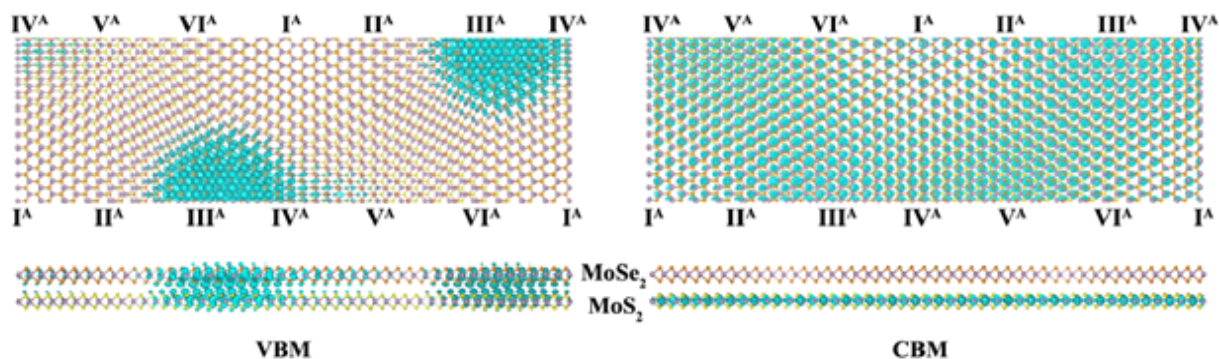
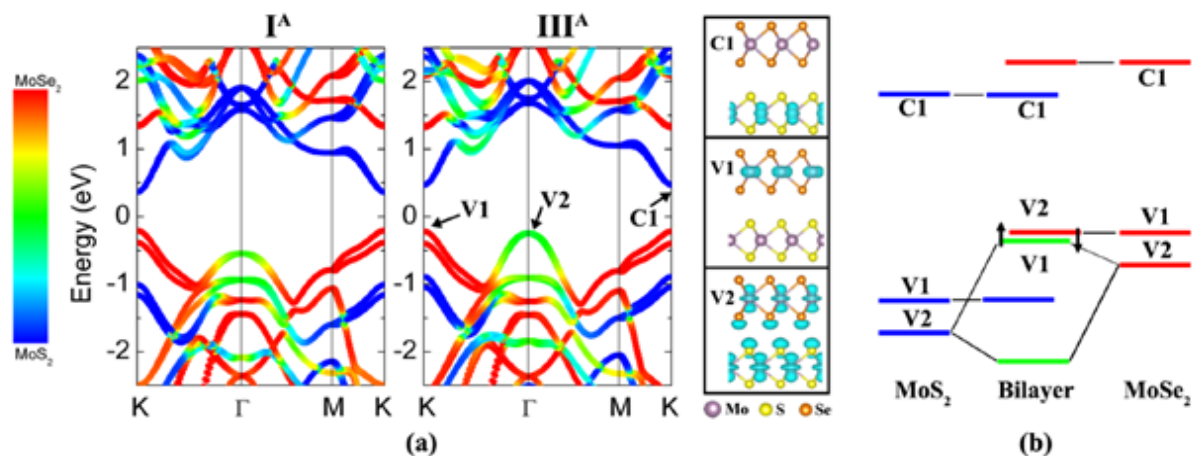


◆在两层 $\text{MoS}_2/\text{MoSe}_2$ 形成的异质结中，范德瓦尔斯力不足以形成晶格匹配的异质结！而是形成一种称为“莫氏图案”（Moire pattern）的结构。

◆原胞是 MoS_2 是 24×24 ， MoSe_2 是 23×23 ，包括6630个原子。

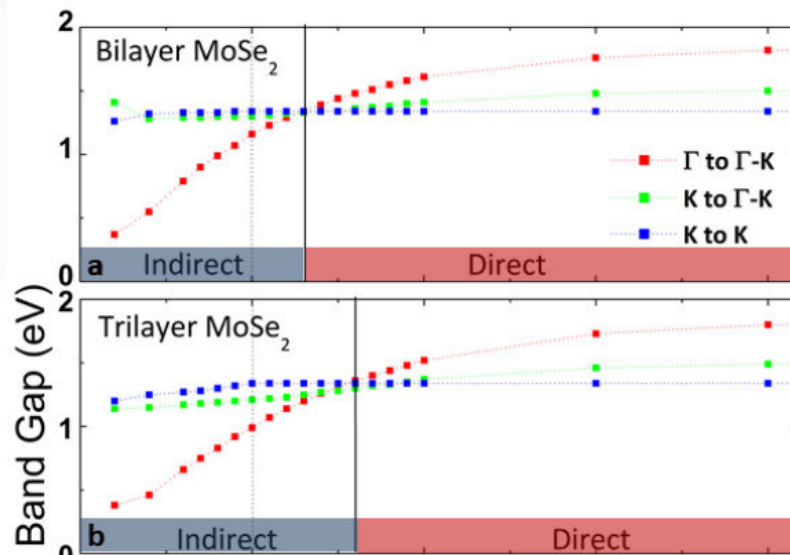
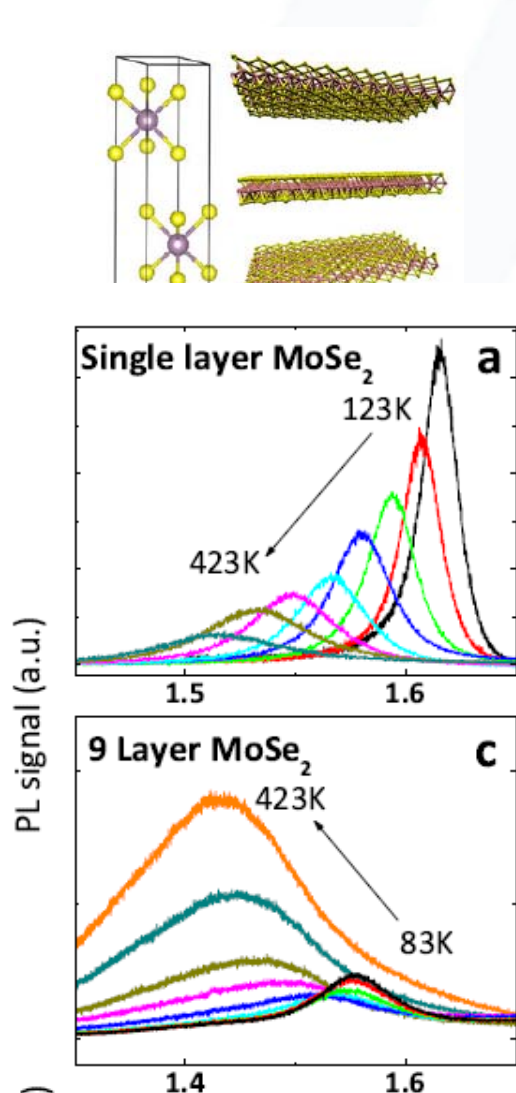
J. Kang, Jingbo Li*, S. S. Li, J.B. Xia, and L-W. Wang*, *Nano Letters*, 13 5485 (2013)

二维单层MoS₂/MoSe₂的异质结形成莫氏图案的成因



我们发现电子的波函数是扩展态，而空穴的波函数是局域态

多层MoSe₂中的热致间接-直接带隙转换



◆室温下，单层MoSe₂具有直接带隙，而多层MoSe₂具有间接带隙。

◆层数较少时，多层MoSe₂的间接带隙和直接带隙值很接近。

◆随着温度的升高，层间距增大，层间耦合变弱，多层MoSe₂将发生间接到直接的带隙转变。



2012年12月7日《自然·纳米技术》以“研究亮点”报道了李京波教授与美国合作者在二维MoSe₂材料研究中取得的重要进展

<http://www.nature.com/nnano/journal/v7/n12/full/nnano.2012.226.html>



[nature.com](#) > [journal home](#) > [current issue](#) > [research highlights](#) > [full text](#)

NATURE NANOTECHNOLOGY | RESEARCH HIGHLIGHTS



Our choice from the recent literature

Nature Nanotechnology **7**, 772 (2012) | doi:10.1038/nnano.2012.226

Published online 05 December 2012

- Download PDF
- Citation
- Reprints
- Rights & permissions

| | | |
|-------------------------------|---------------------------------|--|
| Journal home | Subscribe | |
| Current issue | E-alert sign up | |
| For authors | RSS feed | |

nature
الطبعة العربية

In partnership with:

معهد الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية
MIST

- Metal dichalcogenides: The hotter the brighter

[Nanomaterials: Tools for Sherlock Holmes](#) • [Metal dichalcogenides: The hotter the brighter](#) •

[Metal-organic frameworks: A very fine sieve](#) • [Self-assembly: Tied up](#)

Nano Lett. **12**, 5576–5580 (2012)

Photoluminescence emission following excitation with laser radiation is an optoelectronic process that occurs in most semiconductors. The laser excitation provides energy for electrons to be promoted from the valence to the conduction band. After a short time the electrons relax back to the valence band and in doing so they emit light (photoluminescence). In common semiconductors, the photoluminescence intensity is higher at lower temperatures, as thermal energy induces ways for the electrons to relax other than by photoluminescence emission. Stefaattin Tonqay, Junqiao Wu

Postdoctoral Positions in Biophysics and Nanotechnology

Chalmers University of Technology - Dep of Chemical and Biological Engineering

Associate or Assistant Professor (tenure-track)
Osaka University

Endowed Professorship in Cancer Therapeutics
Purdue University

Postdoctoral research fellow on Scanning Tunneling Spectroscopy

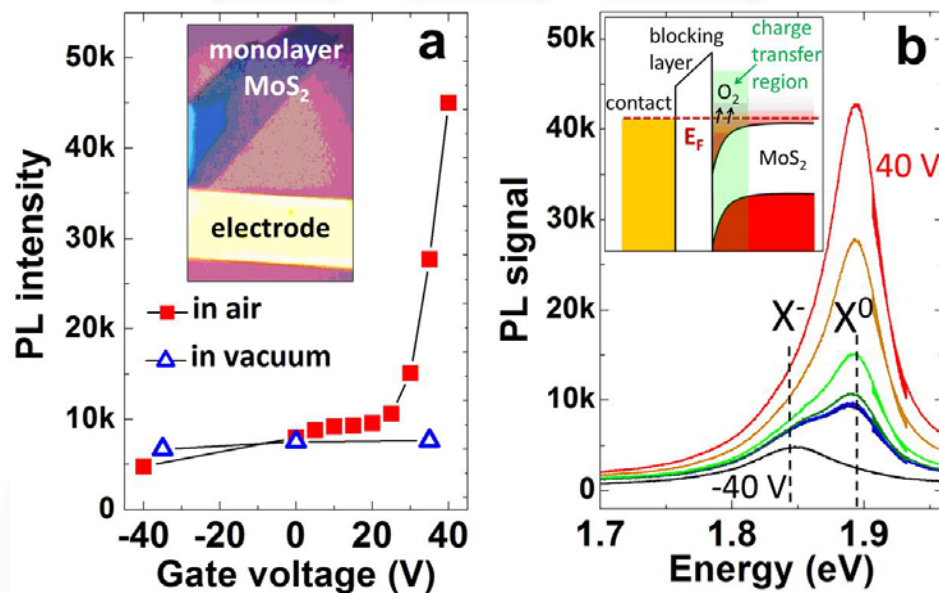
CIC nanoGUNE Consolider Research Center

[Post a free job](#) >

[More science jobs](#) >



二维半导体中分子吸附导致的发光增强



◇ 发光强度的变化是由于半导体中部分电子向O₂、H₂O等分子转移。

◇ 对于n型的MoS₂、MoSe₂而言，电荷转移减小了载流子浓度，从而减小了电荷屏蔽，有利于激子生成，使得辐射复合率提高。

◇ 对p型的WSe₂而言，电荷转移增加了载流子浓度，不利于激子的稳定，降低了辐射复合率。

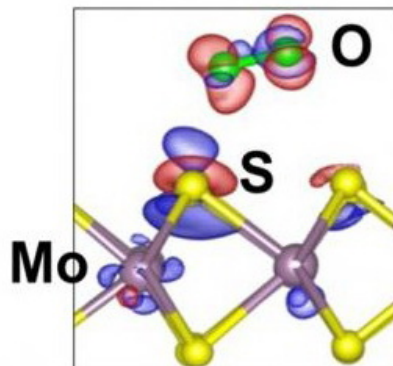
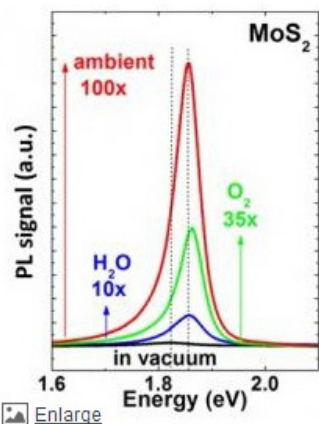
◇ 在O₂、H₂O吸附的情况下，通过电场可进一步控制发光效率。

Scientists enhance light emission in 2D semiconductors by a factor of 100

May 08, 2013 by Lisa Zyga [report](#)

2013年5月8日世界科技研究网站(Phys.Org)报道了李京波研究员与美国合作者在二维半导体材料发光增强研究中取得的重要成果

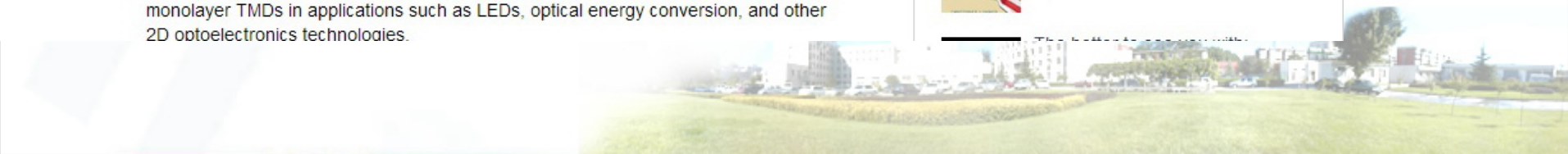
<http://phys.org/news/2013-05-scientists-emission-2d-semiconductors-factor.html>



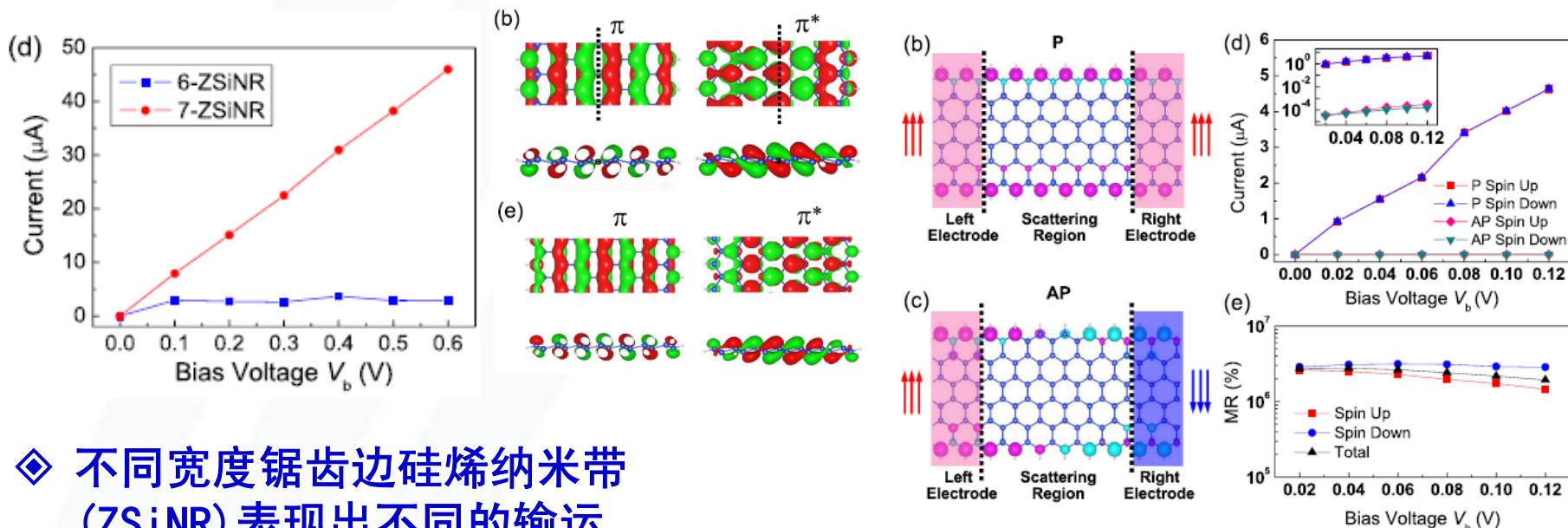
(Left) Graph showing the change in photoluminescence of MoS₂ upon exposure to H₂O alone, O₂ alone, and ambient air at pressures of 7, 200, and 760 Torr, respectively. (Right) Figure showing the charge density difference between pristine MoS₂ ... [more](#)

(Phys.org) —The mention of a two-dimensional material with excellent electrical and optical properties may first bring to mind graphene. However, this description also fits another class of materials called transition metal dichalcogenides (TMDs). Although TMDs in bulk form have been studied for decades—before graphene was even discovered—only recently they have been isolated to monolayers. With recent advances in nanomaterial characterization, scientists have recognized the potential of monolayer TMDs in applications such as LEDs, optical energy conversion, and other 2D optoelectronics technologies.

| Featured | Popular | Most shared |
|----------|--|-------------|
| | Tests find Rossi's E-Cat has an energy density at least 10 times higher than any conventional energy source / May 23, 2013 207 | |
| | The tea party and the politics of paranoia / May 22, 2013 35 | |



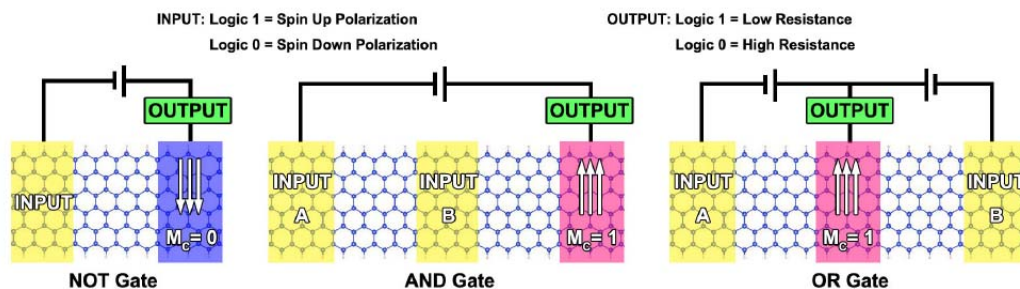
硅烯及石墨炔纳米带中的自旋滤波和磁阻效应



◆ 不同宽度锯齿边硅烯纳米带 (ZSiNR) 表现出不同的输运特性。这与它们的 π 和 π^* 带的对称性有关。

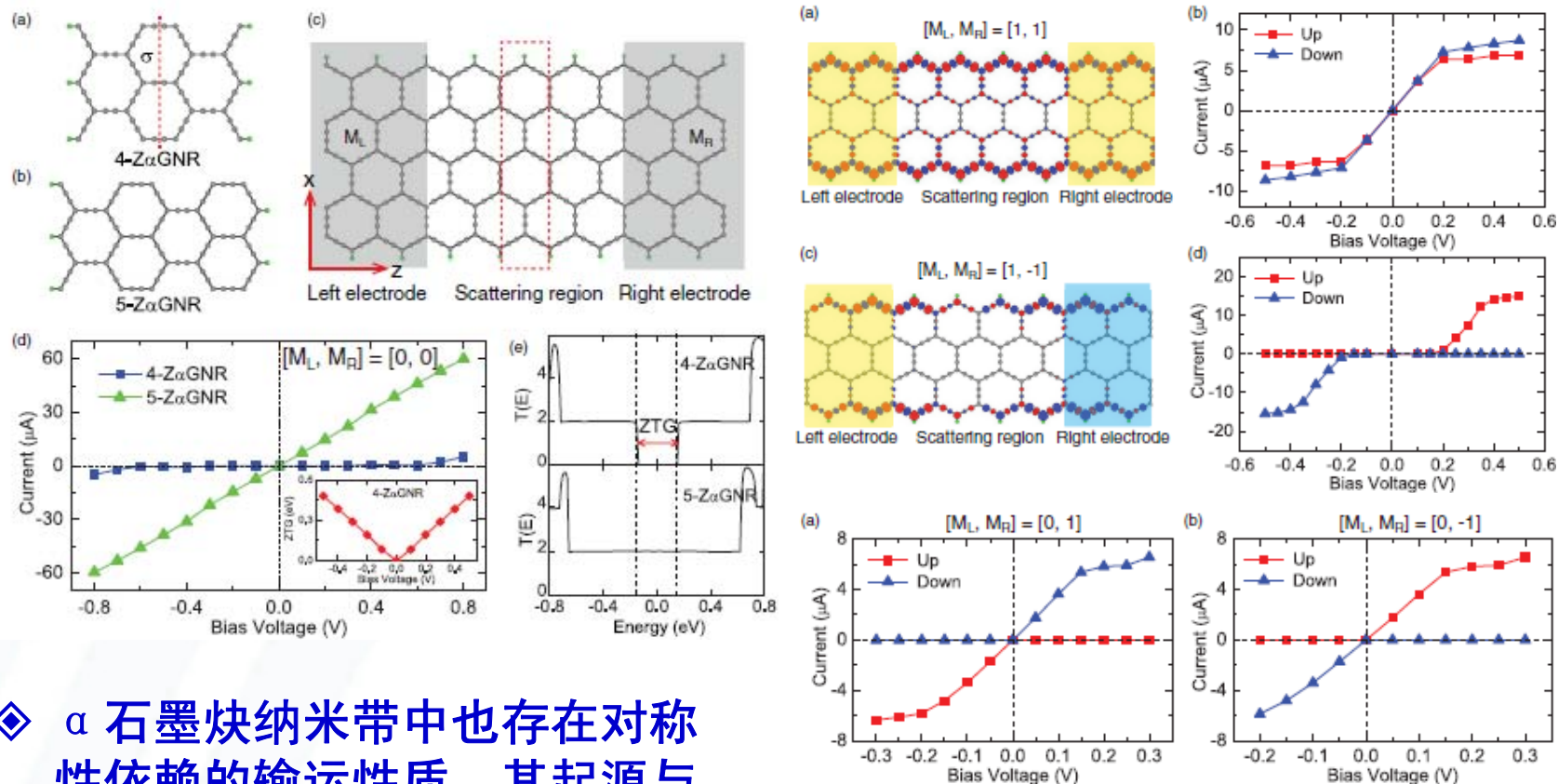
◆ 铁磁态的偶数N ZSiNR将呈现磁阻效应，开关比可达 10^4 。

◆ 磁阻效应可用于逻辑器件设计，如与、或和非门。



Jun Kang, Fengmin Wu, and Jingbo Li*,
Appl. Phys. Lett. 100, 233122 (2012)

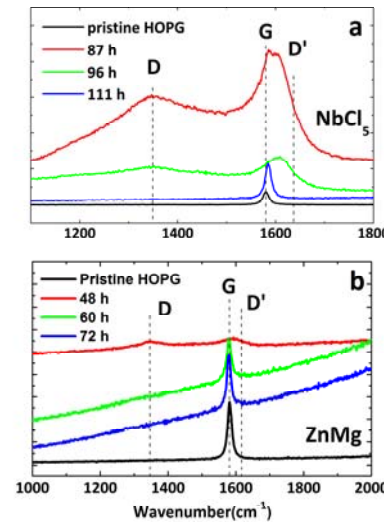
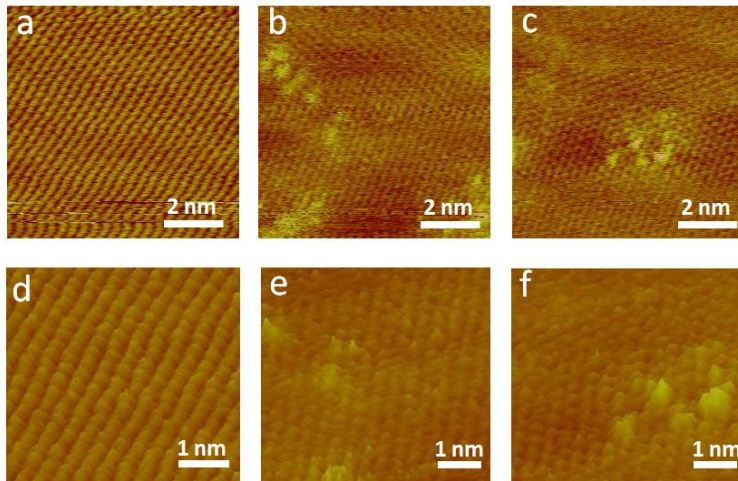
石墨炔纳米带中的自旋滤波和磁阻效应



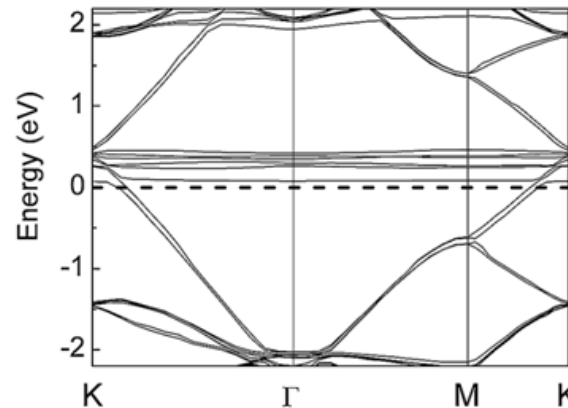
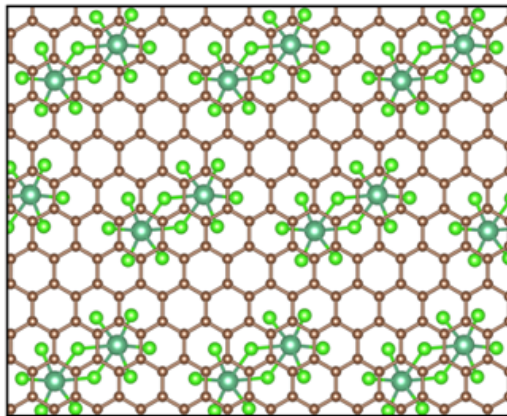
- ◆ α 石墨炔纳米带中也存在对称性依赖的输运性质。其起源与硅烯纳米带类似。
- ◆ 通过改变两个电极的磁性和偏压方向，可以实现双重自旋滤波。

Q. Yue, S. L. Chang, J. C. Tan, S. Q. Qin, J. Kang, and Jingbo Li*, **Phys. Rev. B** 86, 235448 (2012)

多层石墨烯的p型和n型掺杂



- 首次从实验上制备了 ZnMg 和 NbCl₅插层石墨。
- ZnMg和NbCl₅插层将分别导致p型和n型掺杂。
- p型和n型掺杂浓度分别可达到 10^{19} cm^{-3} 和 10^{18} cm^{-3} 。

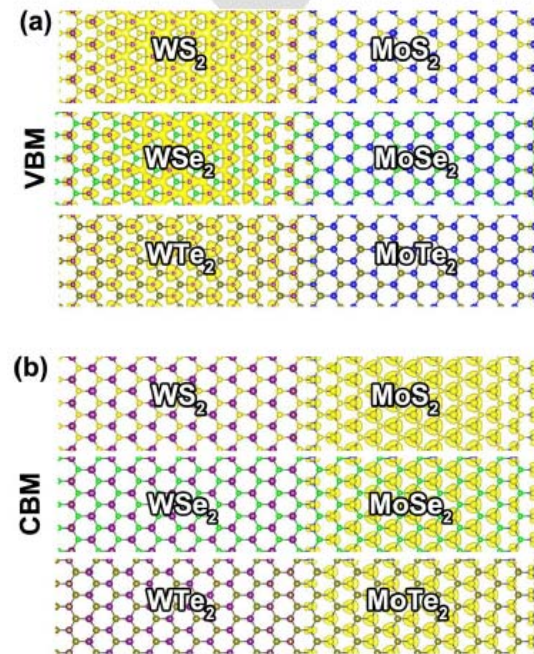
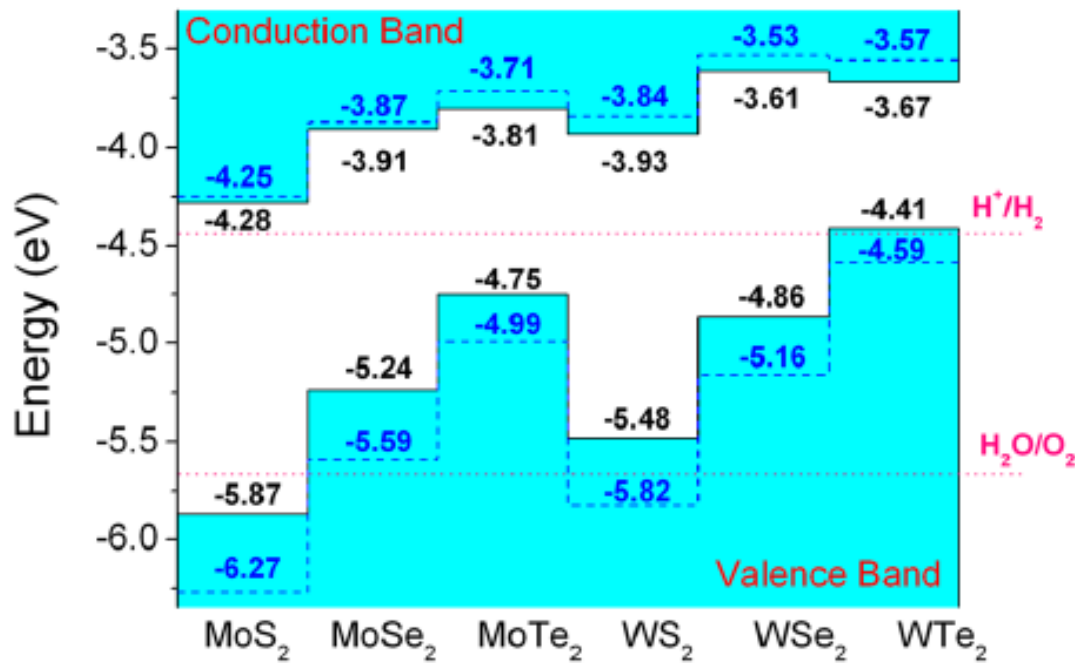


- 理论计算进一步验证了实验结果。

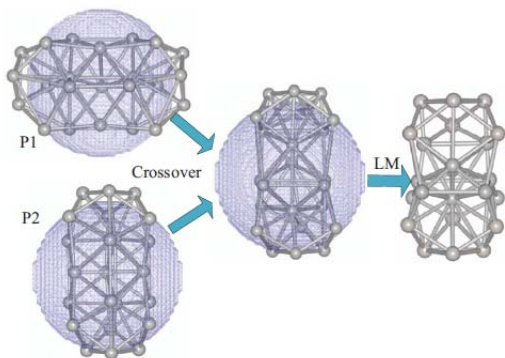
X.Q. Meng, S. Tongay, J. Kang, Z.H. Chen, F. M. Wu, S.-S. Li, J.-B. Xia, Jingbo Li* and J. Q. Wu, **Carbon**, 57, 507 (2013).

硫化钼系半导体材料MX₂的带阶

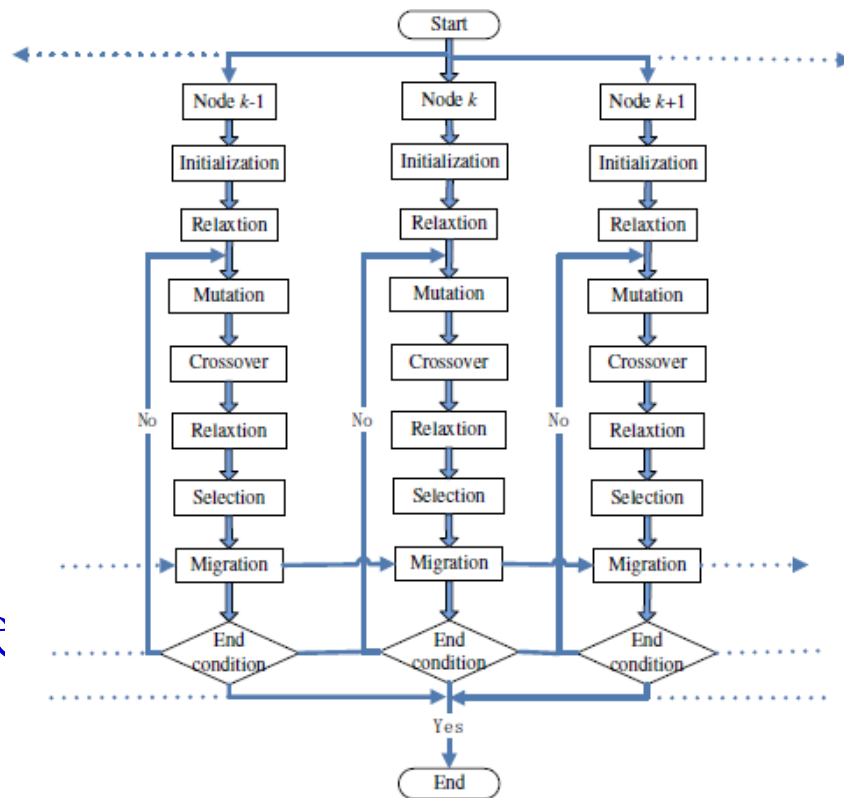
- ◇ 计算了单层硫化钼系半导体材料MX₂的带阶 (M=Mo, W; X=S, Se, Te)。基本趋势为，随阴离子原子序增加，CBM和VBM能量上升。当阴离子相同时，WX₂带边能量比MX₂高。
- ◇ MX₂-WX₂异质结几乎没有晶格失配，且带阶为II类，有利于电子和空穴的分离。



纳米材料结构优化算法



- ◆ 提出的**PDECO**（德搜）算法，速度为同类方案的**2-5**倍，并找到了**Co**和**Pt**系列团簇的新的能量最小值。
- ◆ 提出的结构优化球面切分算子，能替代广泛使用的平面切分算子，可避免平面切分算子的不足，更为简单和有效。



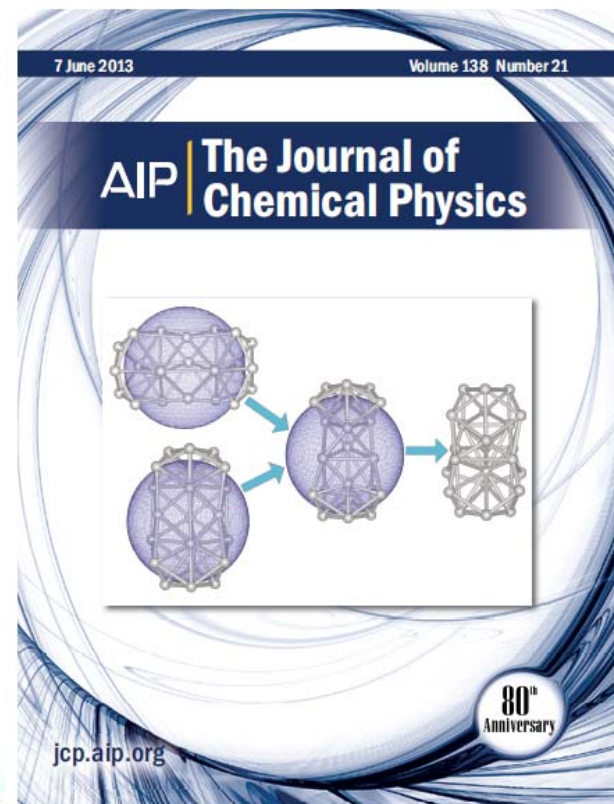
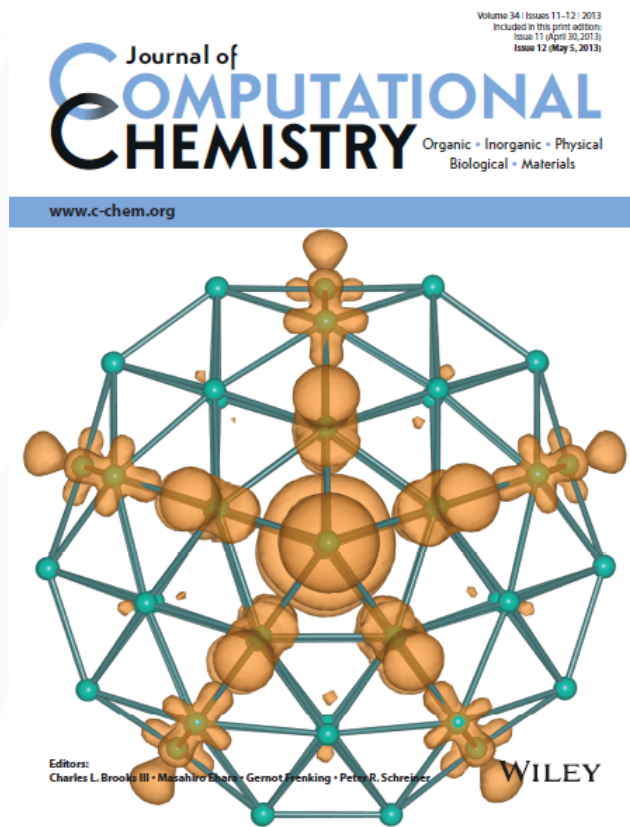
Zhanghui Chen, Xiangwei Jiang, **Jingbo Li***, Shushen Li, and Linwang Wang*, J. Comp. Chem. 34, 1046 (2013).

Zhanghui Chen, Xiangwei Jiang, **Jingbo Li***, and Shu-Shen Li. J. Chem. Phys., 138, 214303, (2013).

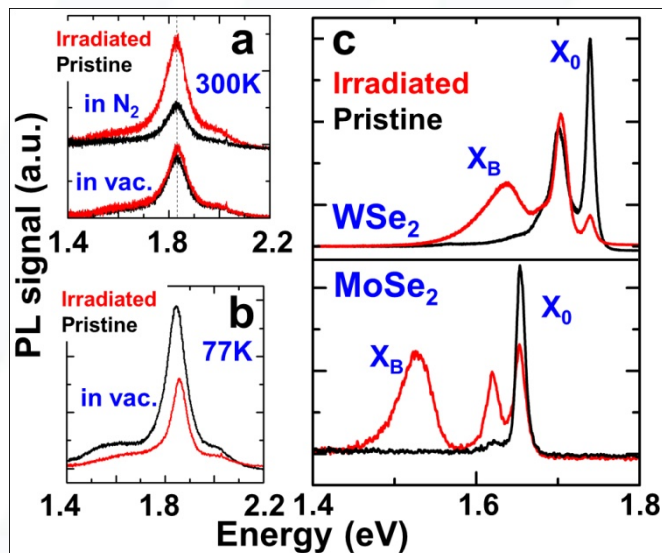
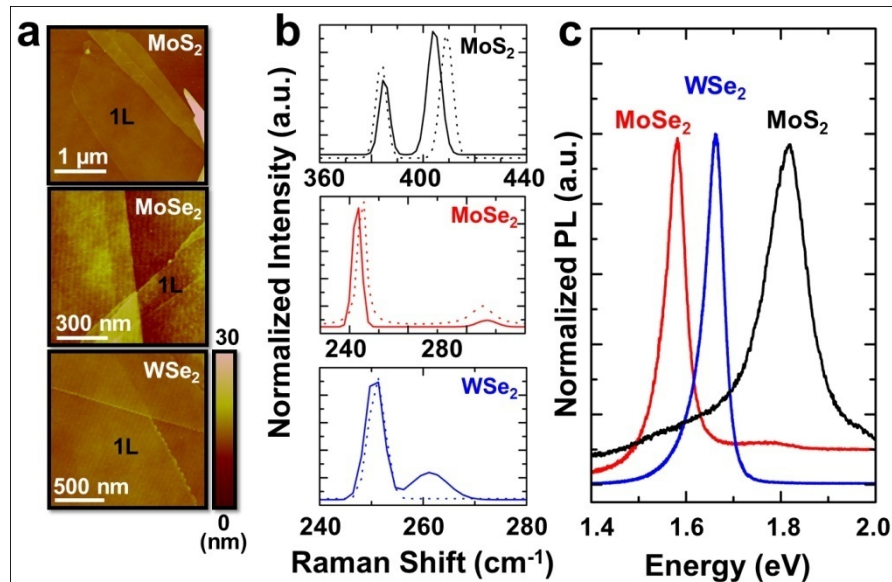
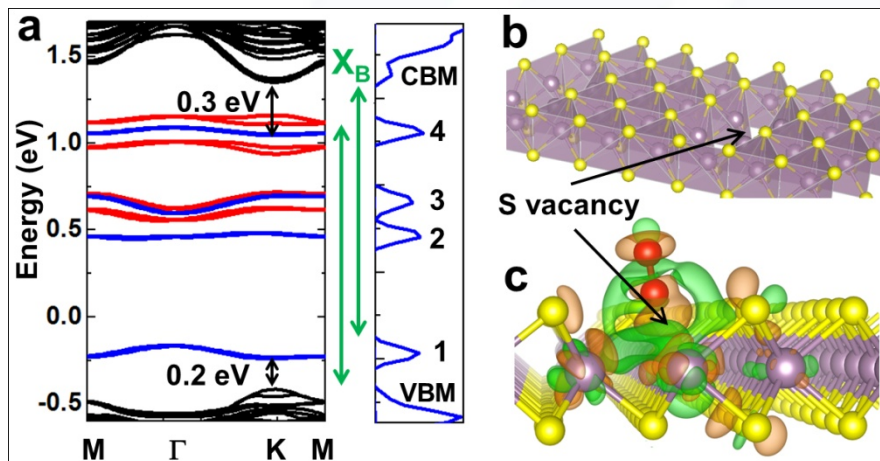


纳米材料结构优化算法

相关成果被J. Chem. Phys.、J. Comp. Chem. 等
期刊选为封面论文。



二维材料缺陷发光性质研究

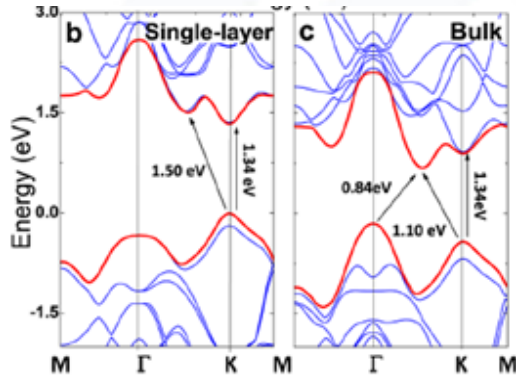


通过辐照和退火的方法获得二维材料中的硫空位或者是硒空位

研究表明：在二维材料中，某些情况下缺陷可以导致发光增强，因此，我们不能单单从PL谱的特征来判断缺陷的种类和性质

S. Tongay, J. Suh, C. Ataca, W. Fan, A. Luce, J. S. Kang, J. Liu, C. Ko, R. Raghunathan, J. Zhou, F. Ogletree, Jingbo Li, J. C. Grossman, and J. Wu, **Scientific Report**, 3, 2657, 2013.

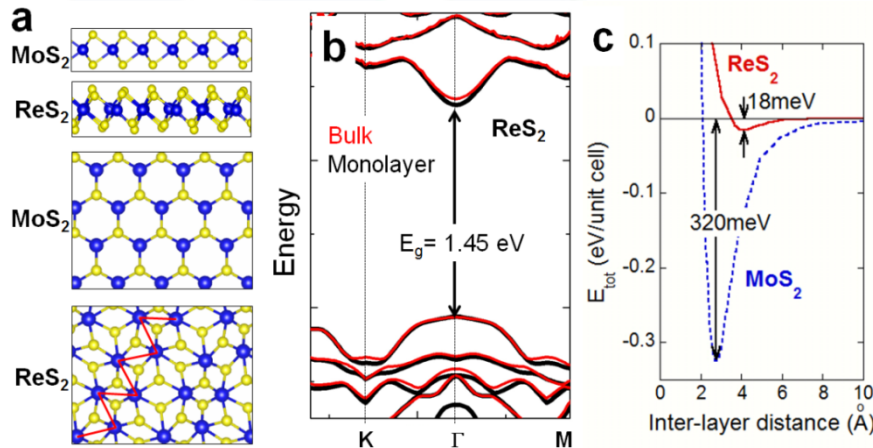
ReS₂—是一种新的二维材料:这一重大发现改变了人们对传统二维材料的认识



通常,我们知道:无论是石墨烯还是MoSe₂,其单层的电子结构与多层或者是体材料有显著不同,这是因为量子限制效应的作用。

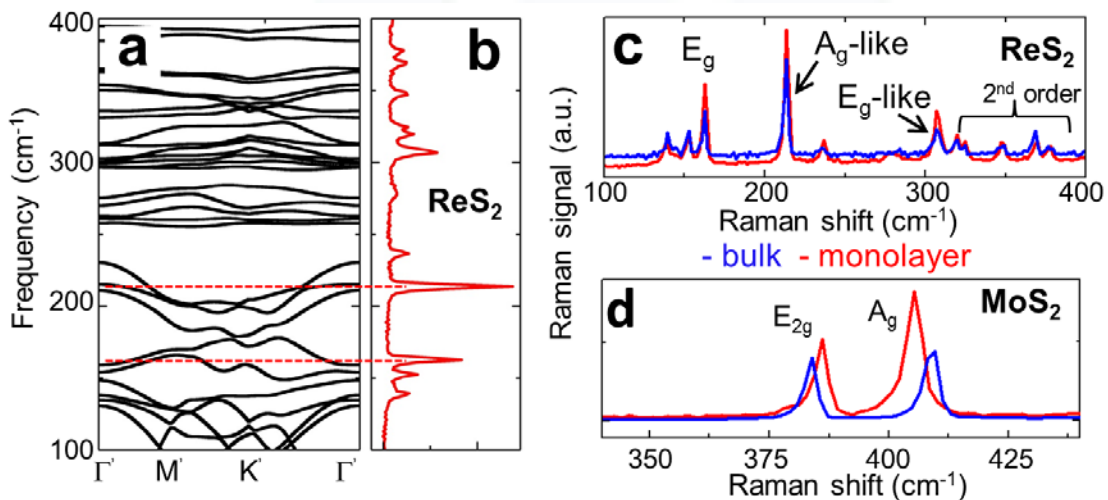
计算表明: ReS₂单层二维材料与体材料的能带结构类似。

为什么? 密度泛函计算显示,单层的ReS₂为1T相,并且会产生佩尔斯畸变。这一畸变将会阻止ReS₂的有序堆积,并将层间电子波函数的交叠最小化,从而导致层间退耦合。



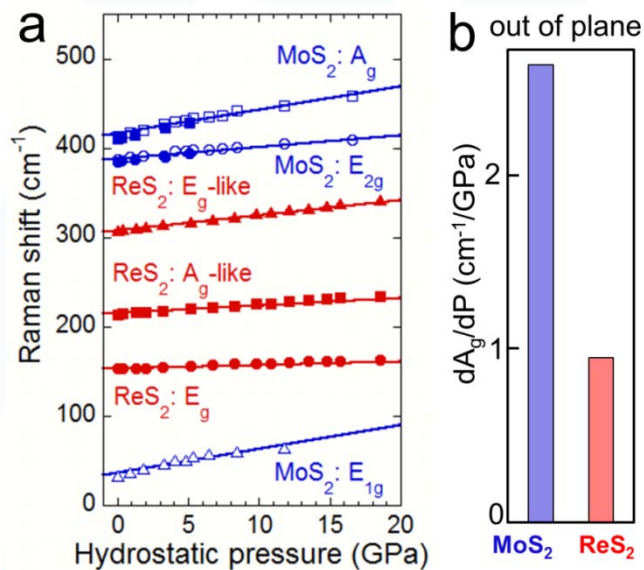
S. Tongay, H. Sahin, C. Ko, A. Luce, W. Fan, J. Zhou, Y. S. Huang, J. Yan, F. Ogletree, S. S. Li, Jingbo Li, F. M. Peeters, and J. Wu, **Nature Comm.**, 5, Article number: 3252 doi:10.1038/ncomms4252 (2014).

ReS₂—新型二维材料: 单层与体材料电子结构一致



ReS₂单层和体材料的Raman峰是一致的，但是MoS₂单层和多层Raman峰却有明显移动。

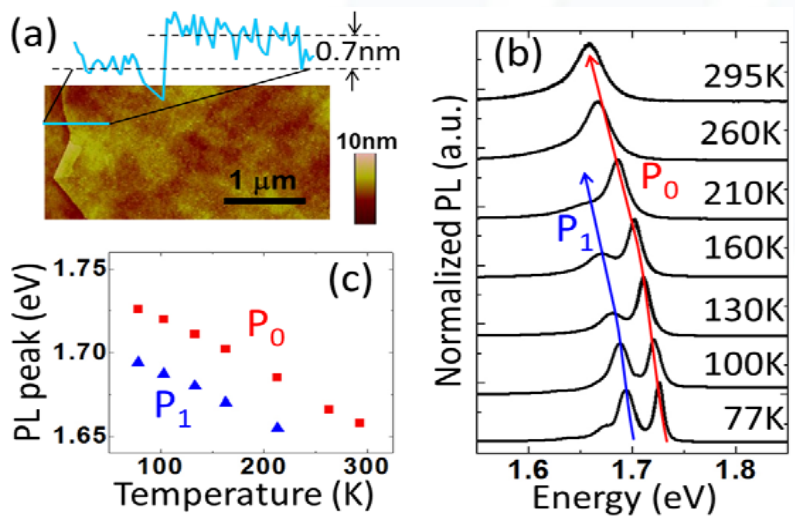
实验表明：在静压力下，ReS₂的Raman峰随压强的增大有很小的移动，但是MoS₂的Raman峰随压强的增大却有显著的变化。



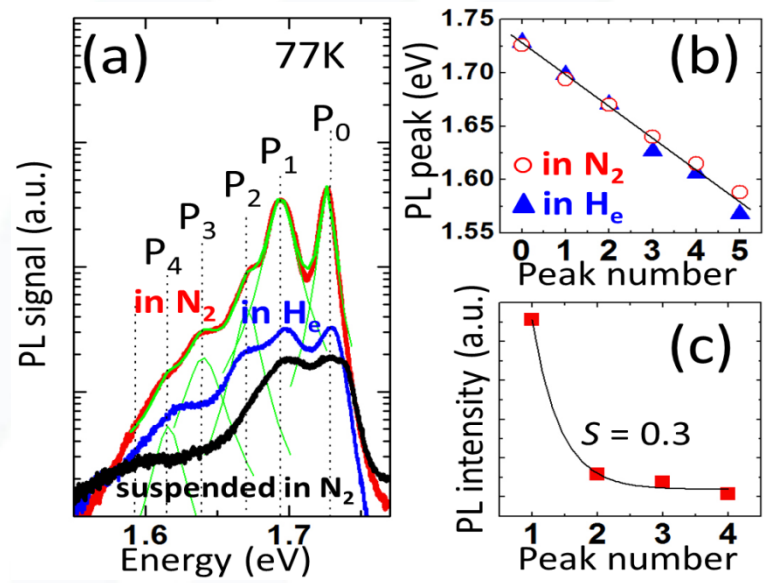
ReS₂体材料的这种特性将使得它成为研究二维材料新奇物理性质的一个优良的平台，而无需制备高质量的单层材料。这将对二维材料的实验研究产生重要影响！

S. Tongay, H. Sahin, C. Ko, A. Luce, W. Fan, J. Zhou, Y. S. Huang, J. Yan, F. Ogletree, S. S. Li, Jingbo Li, F. M. Peeters, and J. Wu, **Nature Comm.**, 5, Article number: 3252 doi:10.1038/ncomms4252 (2014).

单层WSe2有很强的电子-声子相互作用

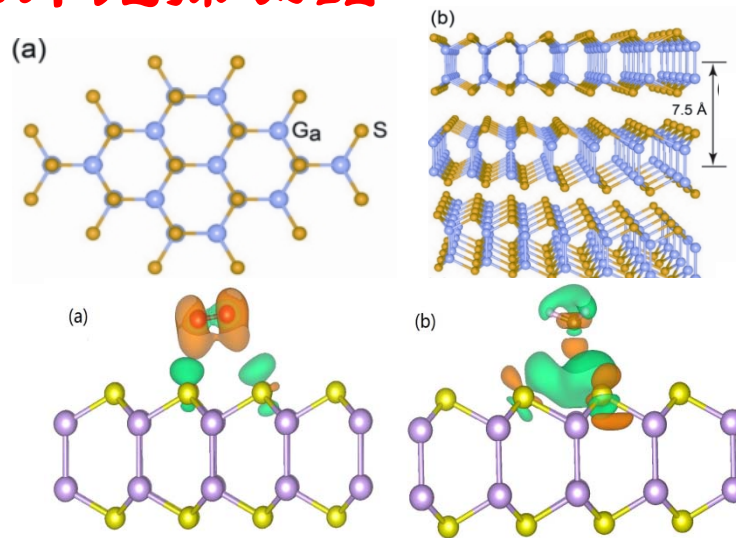
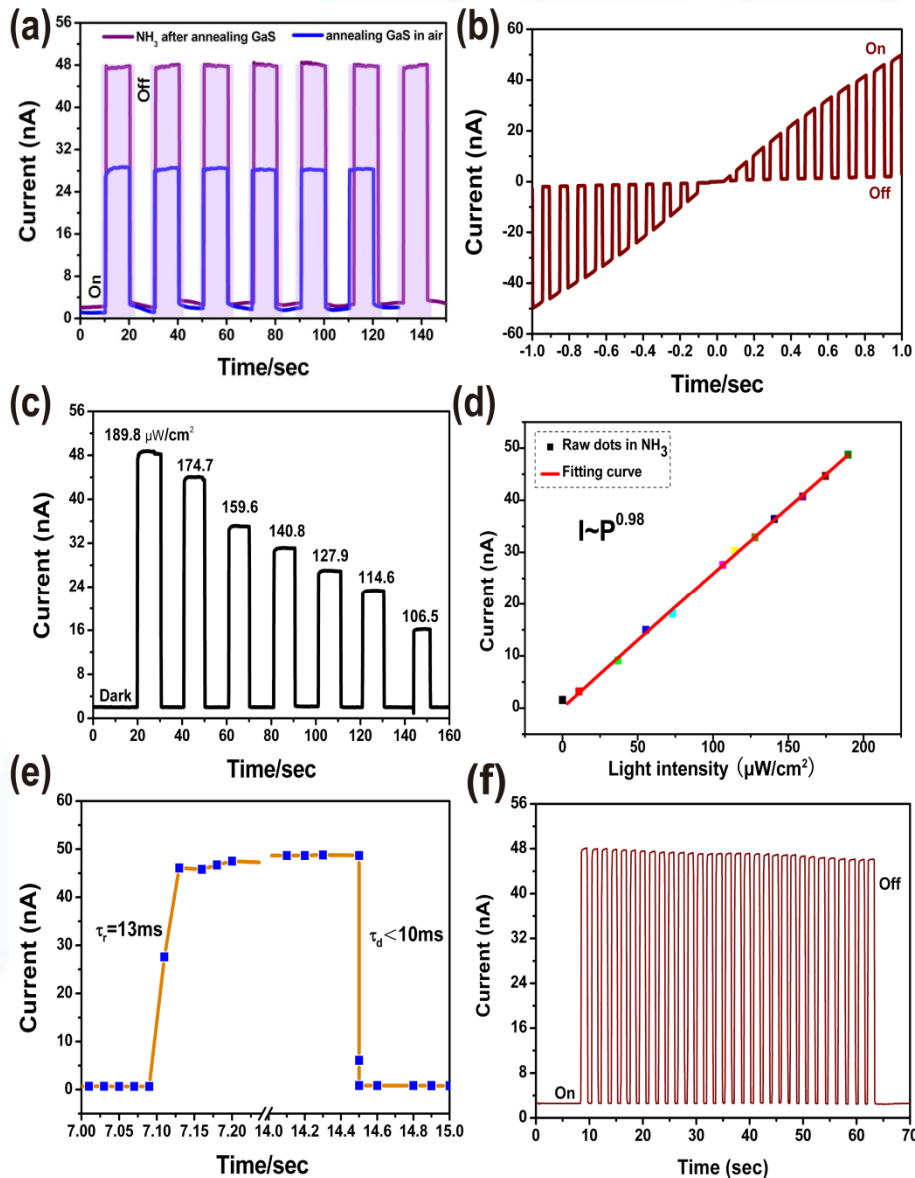


随着温度的降低, 单层二维WSe2的PL谱的带边发光峰P₀和声子伴线P₁也明显地出现在PL谱中



在二维材料的表面与某些气体, 如N₂气, 会极大地增强电子-声子相互作用, 所以在低温的PL谱中, 我们可以发现P₁, P₂, P₃, P₄等声子峰. 实验测定的Huang-Rys因子是0.3

超薄二维GaS半导体红外光探测器



◆ 二维材料与物理吸附的气体分子之间发生电子转移，改变材料本身载流子密度，在不同气体环境 (NH_3 , air, O_2) 下，产生不同的光响应。

◆ 在 NH_3 环境下，光响应快速且稳定，光敏性高达 64.43 AW^{-1} ，外部量子效率为 12621%。

S. Yang, Y. Li, X. Wang, N. Huo, J. Xia, S. Li, J. Li,* **Nanoscale**, 6, 2582 (2014).



2014年2月7日 《Nanoscale》以“热点论文”报道了李京波小组在二维超薄GaS材料研究中取得重要进展

网页连接：<http://blogs.rsc.org/nr/>

Publishing
Journals, books and databases

Home
Nanoscale Blog RSS

Nanoscale Blog

← Older Entries

Nanoscale Issue 4 of 2014 out now!

04 Feb 2014

By Katherine Dunn, Publishing Assistant.

Nanoscale is delighted to present its current issue.

Towards biocompatible nano/microscale machines: self-propelled catalytic nanomotors not exhibiting acute toxicity is the article highlighted on the outside front cover by Elaine Lay Khim Chng, Guanxia Zhao and Martin Pumera.

The inside front cover features an article on Design of advanced porous graphene materials: from graphene nanomesh to 3D architectures by Lili Jiang and Zhuangjun Fan.

Issue 3 contains the following Review, Feature and Mini-review articles:

Highly reactive {001} facets of TiO₂-based composites: synthesis, formation mechanism and characterization
Wee-Jun Ong, Ling-Ling Tan, Siang-Piao Chai, Slek-Ting Yong and Abdul Rahman Mohamed

Engineering BIOX (X = Cl, Br, I) nanostructures for highly efficient photocatalytic applications
Hefeng Cheng, Baibiao Huang and Ying Dai

Metallic glass nanostructures: fabrication, properties, and applications
Lianci Liu, Molla Hasan and Golden Kumar

Inorganic nanostructured materials for high performance electrochemical supercapacitors
Sheng Liu, Shouheng Sun and Xiao-Zeng You

Add a Comment >

This week's HOT articles

04 Feb 2014

By Katherine Dunn, Publishing Assistant.

Take a look at this week's selection! These articles are available free for a limited time:

High performance few-layer GaS photodetector and its unique photo-response in different gas environments
Shengxue Yang, Yan Li, Xiaozhou Wang, Nengjie Huo, Jian-Bai Xia, Shu-Shen Li and Jingbo Li
DOI: 10.1039/C3NR05965K, Communication

Local structural investigation of Eu³⁺-doped BaTiO₃ nanocrystals
Federico A. Rabuffetti, Sean P. Culver, John S. Lee and Richard L. Brutchey
DOI: 10.1039/C3NR06610J, Paper

Graphene-nickel interfaces: a review
Arjun Dahal and Matthias Batzill
DOI: 10.1039/C3NR05279F, Review Article

Search

Links

- [About the journal](#)
- [Editorial Board](#)
- [Journal Homepage](#)
- [RSC Home](#)
- [Submit an Article](#)

Nanoscale Latest Articles

- [Investigation into the fluorescence quenching behaviors and applications of carbon dots](#)
- [Solution Synthesis of Metal Oxides for Electrochemical Energy Storage Applications](#)

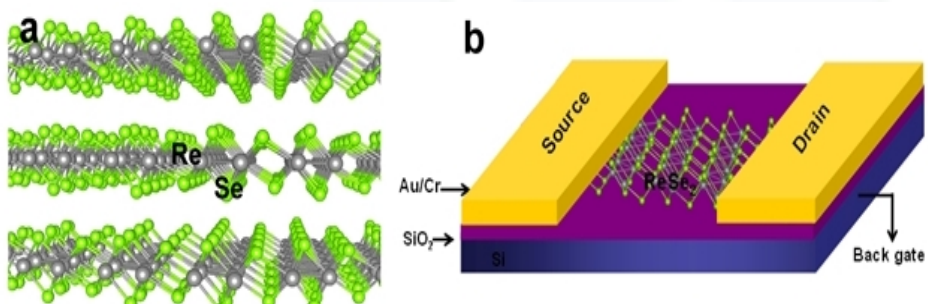
RSC News

- [Royal Society of Chemistry to award CSciTeach](#)
- [President Lesley Yellowlees responds to MPs report on women in science](#)

Meta

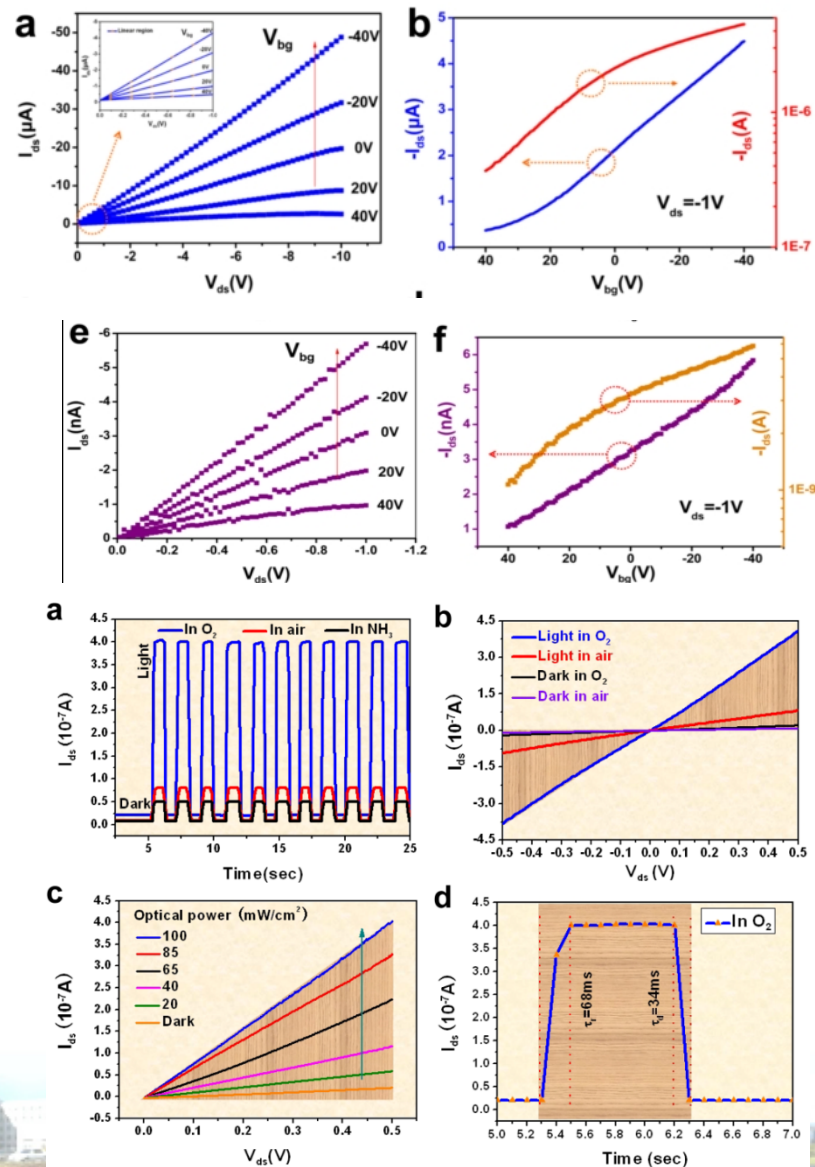
- [Log in](#)
- [RSC Blogs](#)

二维 ReSe_2 场效应管中层数决定的光电响应

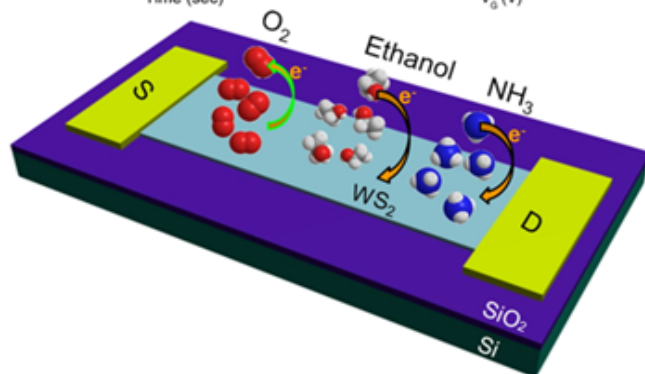
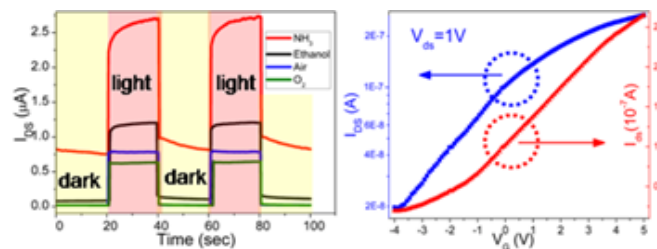
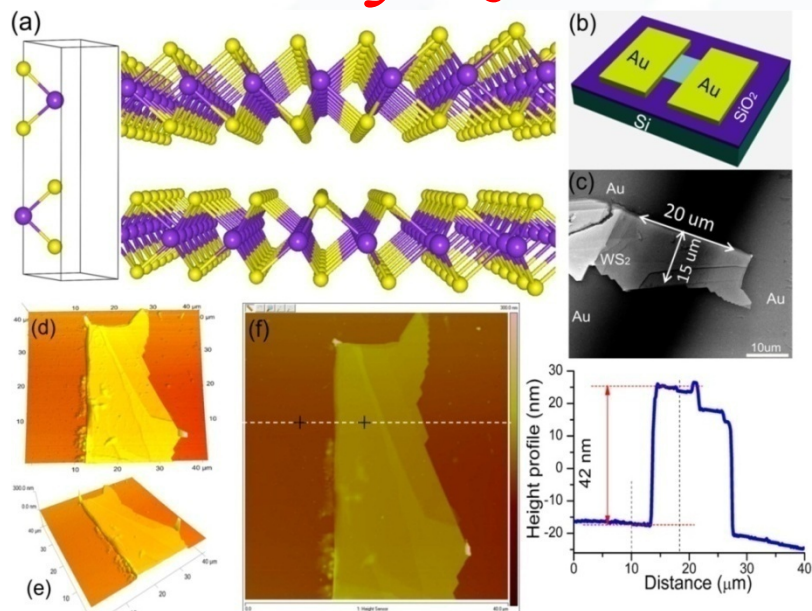


- ◆ 新型二维材料 ReSe_2 中，带系随层数改变，可以调控不同层 ReSe_2 场效应管性质。
- ◆ 单层场效应管迁移率为 $9.78 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，高于少层材料 ($0.10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)，在光的作用下，迁移率提高为 $14.1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。
- ◆ 在气体分子调控下，单层场效应管的光敏性高达 95 AW^{-1} ，外部量子效率为18645%。

S. Yang, Y. Li, X. Wang, N. Huo, J. Xia,
S. Li, J. Li*, S-H. Wei*, submitted, 2014



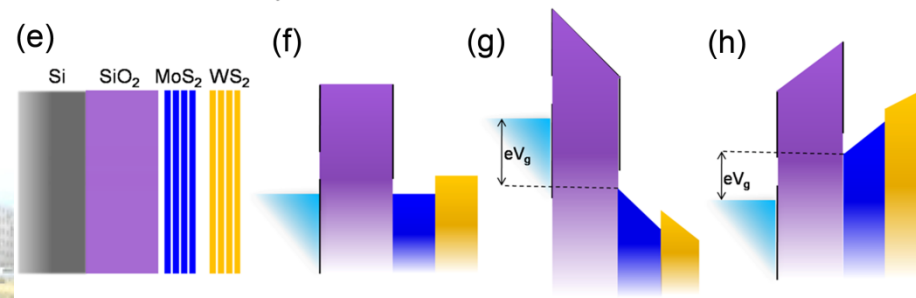
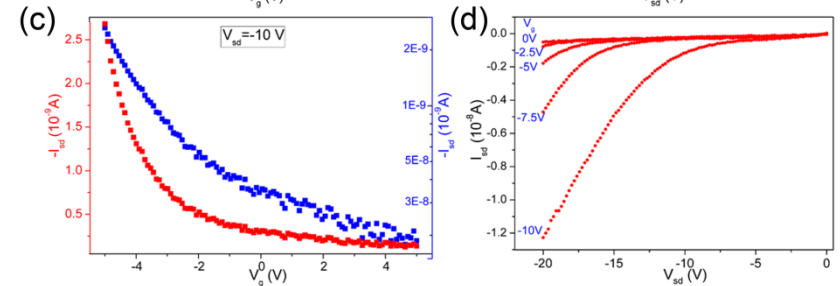
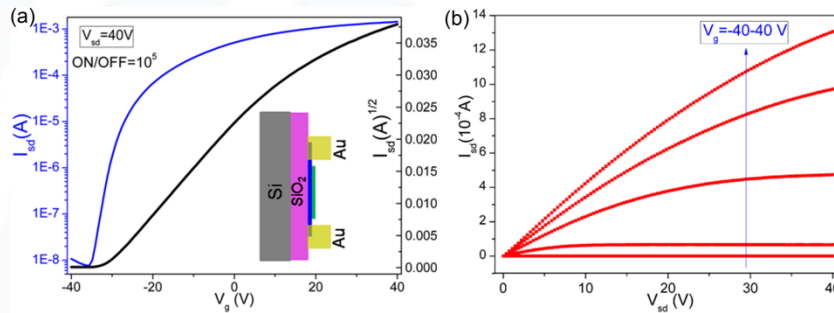
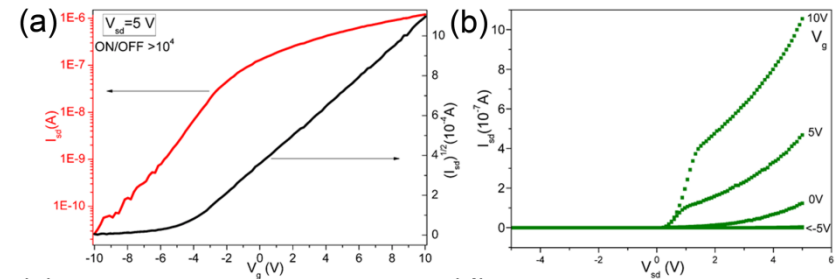
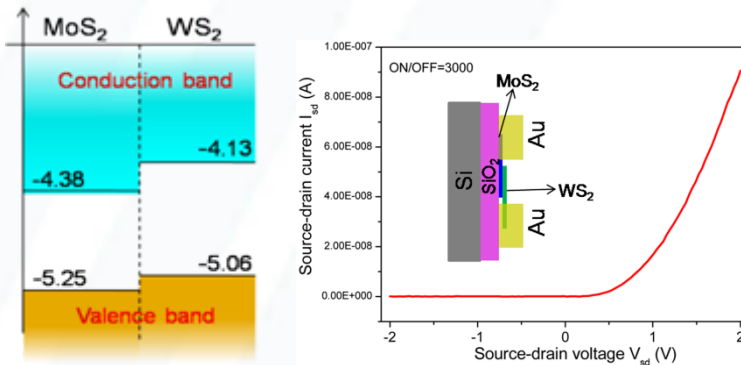
WS₂ nanoflakes 场效应晶体管的光探测和气体探测



- ◆ 发现WS₂基晶体管显示出n-type特性并具有较高的电子迁移率 ($12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)
- ◆ 具有优良的光探测性能: 快速响应 ($<20 \text{ ms}$), 较大的光响应度 (5.7 A/W) 和外量子效率 (1118%)
- ◆ 可以与物理吸附在表面的O₂, NH₃等之间产生电荷转移, 从而影响其光电性能。
- ◆ NH₃, ethanol 等还原性气体可以明显提高其光电性能, 在NH₃氛围下, 光敏度和外量子效率可高达 884 A/W , $1.7 \times 10^5 \%$

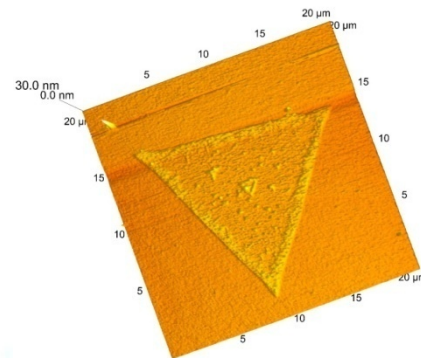
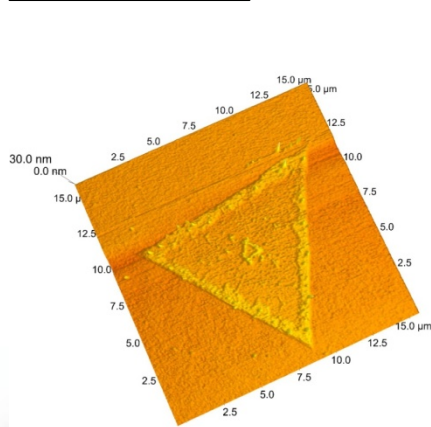
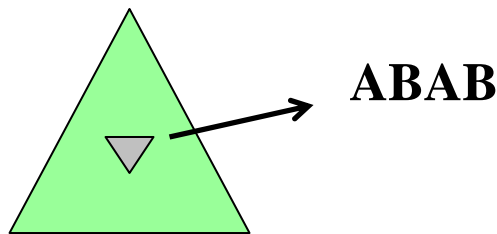
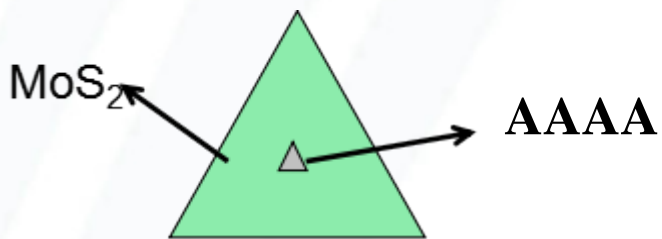
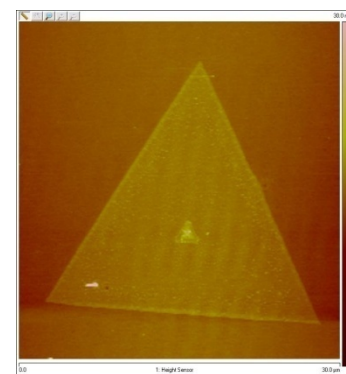
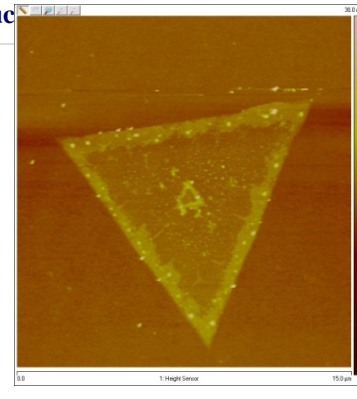
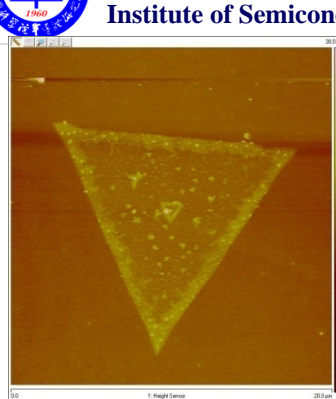
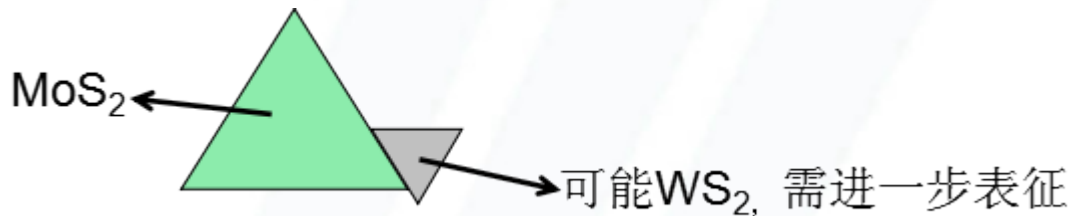
Layered MoS₂-WS₂ 异质结的光电性能

- 我们设计了两种结构的MoS₂-WS₂异质结晶体管 (Vertical and Planar transistors)
- 我们发现Vertical transistors 表现出非常明显的整流特性 (开关比: 1000); 奇特的双极特性 (开启时为n-type, 场效应开关比10⁴, 截止为P-type); 光伏特性 (最大开路电压0.25 V) 以及自驱动光敏特性 (光开关比可达10³)
- 对于planar transistors, MoS₂-WS₂异质结表现了提高的场效应开关比 (可达10⁵), 高的电子迁移率 (65 cm²/Vs) 以及较大的光敏度 (1.42 A/W)



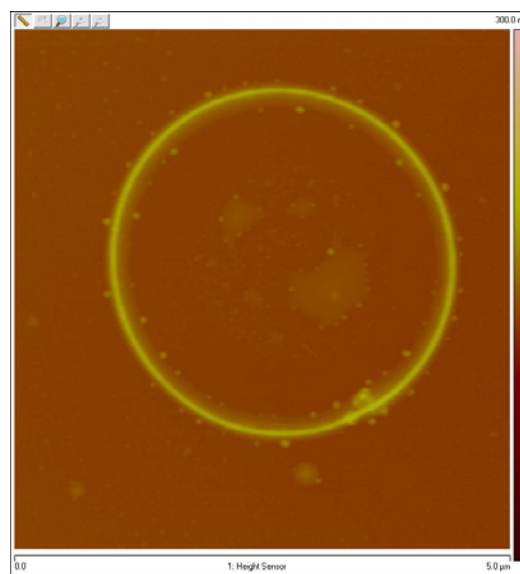
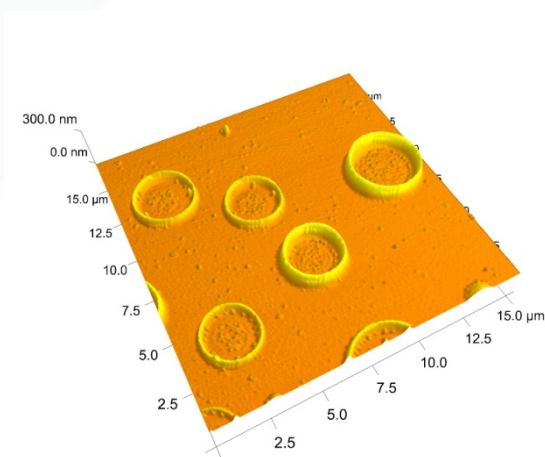
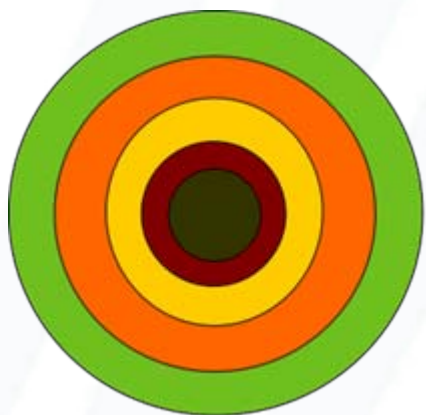
Nengjie Huo, Jun Kang, Shu-Shen Li,
Jian-Bai, Xia, Jingbo Li*, Su-Huai Wei*.
Nature Communications (2014), submitted.

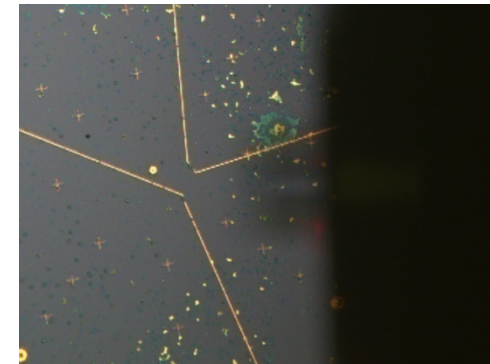
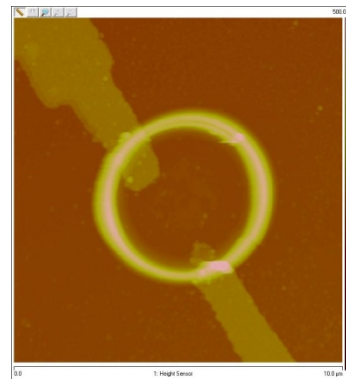
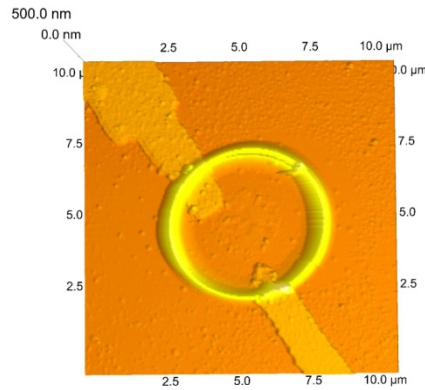
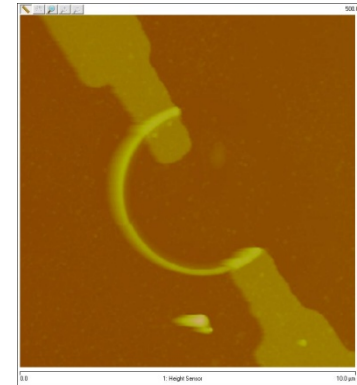
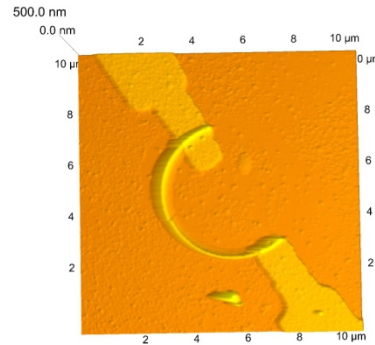
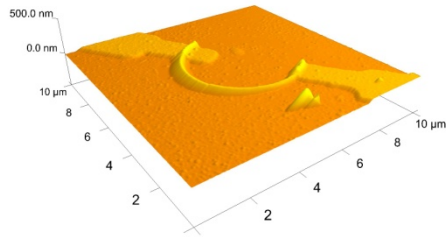
实验进展



MoS₂/WS₂材料的合成

在利用一步法合成异质结时，在硅片的边缘，发现了同心圆形材料，Sef认为可能是富勒烯型硫化物，目前还不确定，他把样品带回去了，通过显微镜观察的材料示意图如下：



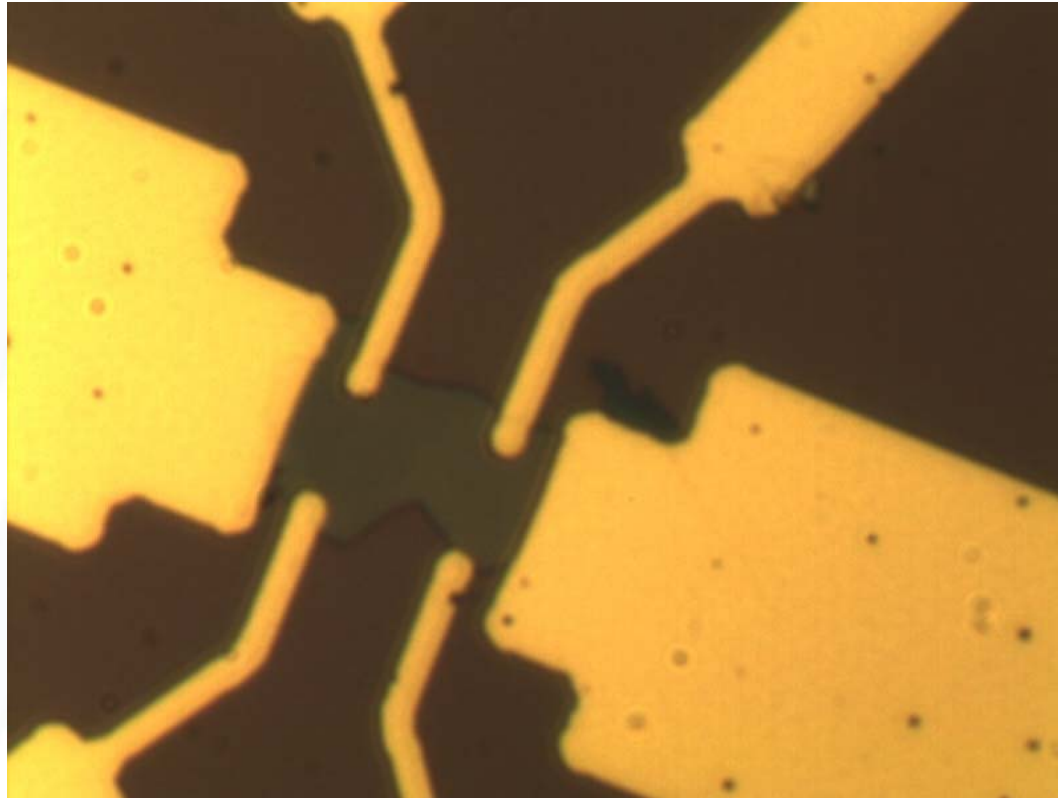


这是MoS₂ ring 的器件AFM图，一共有四个，分别标号1，2，3，4。其中1号样品为半圆形，其它三个为整圆形。我们初步测试，感觉没有场效应，可能是无定形的MoS₂。

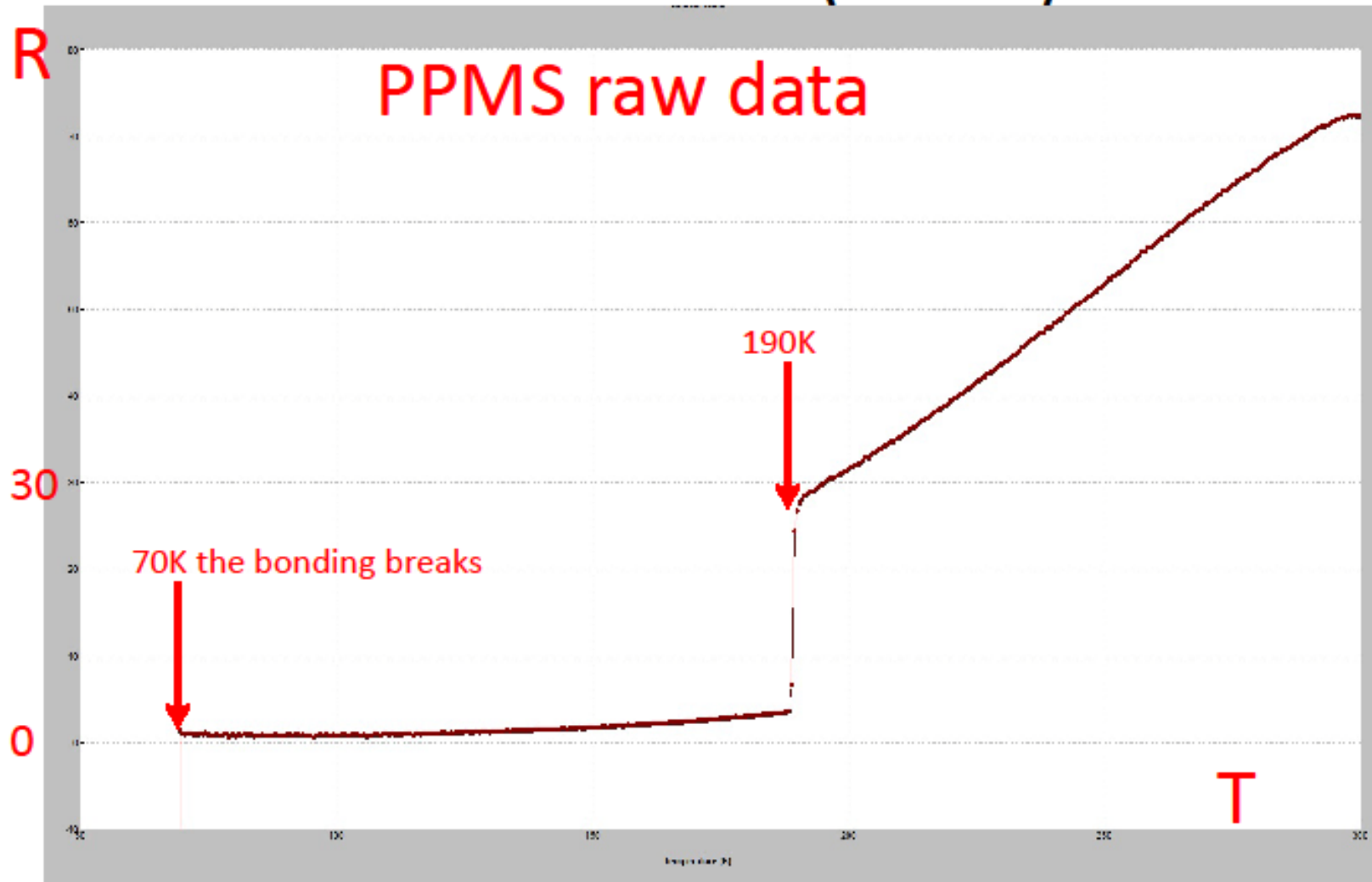




2D Superconducting FeTeSe Flake

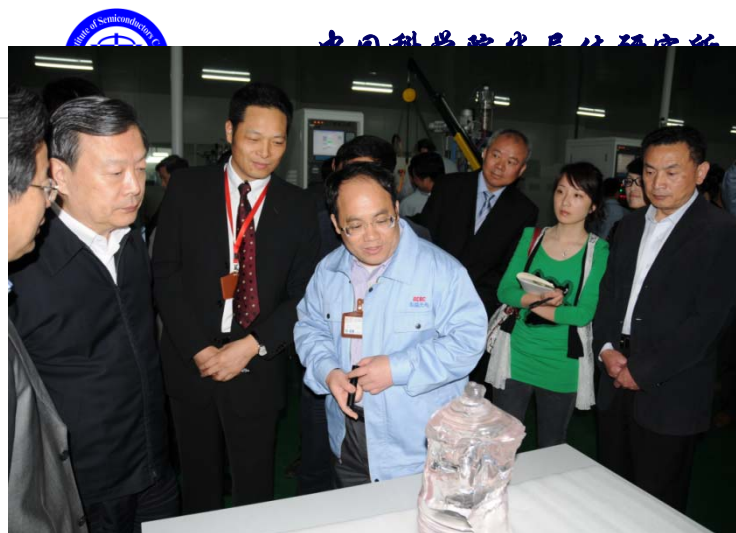


Four-Probe Resistance Vs Temperature of Device #1 (FeSeS)





2012年7月4日原浙江省委书记赵洪祝到东晶光电视察



2012年4月19日浙江省委书记夏宝龙到东晶光电视察



东晶电子董事长李庆跃和中国科学院院士、半导体物理专家夏建白举行“院士专家工作站”授牌和合作签字仪式。



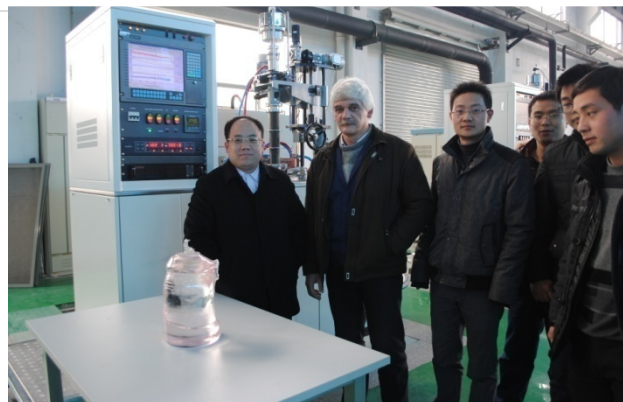
东晶电子董事长李庆跃和李京波团队举行“东晶电子研究院”签约仪式。

李京波团队与浙江东晶光电科技有限公司合作
实现了蓝宝石纳米图形衬底产业化

李京波团队与浙江东晶电子股份有限公司合作，总投资12亿元



80公斤蓝宝石单晶



李京波教授与著名俄罗斯科学院院士GSRiabtchenko博士



2012年6月20日浙江省长李强到浙江师范大学-东晶联合研究院指导工作



2012年6月19日浙江副省长毛光烈到东晶光电指导工作

2011年8月11日李京波团队在浙江光电科技有限公司首次首次生长出30公斤蓝宝石晶体



未来研究计划

- 1、我们实验室用简单的CVD方法生长出大量的二维材料, 如 MoS_2 、 MoSe_2 、 WS_2 、 WSe_2 、 VS_2 、 HfS_2 、 NiS_2 、 TiS_2 、 ReS_2 、 GaSe 、 GaTe 、 CuS 、 CoS 等等。为我们下一步研究二维强关联材料提供了很好的基础。
- 2、调整实验条件, 合成异质结。
 MoS_2 等二维材料与石墨烯等形成Heterostructures, 目前国际上做得很热门, 技术不是很难, 但是有很强的物理。我个人认为, 这个方向很容易出成果。
- 3、如何理解二维“强关联材料”? 现在很时髦的“拓扑绝缘体材料”、“反常量子霍尔材料”与二维材料有什么关系?



今后的研究方向和计划

研究思路：理论计算→材料设计→合成
→表征→器件制备→测试

注意几点：

- (1) 研究方向：“半导体光电功能材料与器件”。
- (2) 加强理论和实验的结合，研究成果对高性能半导体光电子器件将起重要指导作用。
- (3) 以国家重大需求为背景，发挥学科优势，针对半导体材料、器件中的本质物理问题进行研究。
- (4) 新型的二维强关联材料及其光电器件。

衷心感谢各位老师和同学！



感谢中国科学院“百人计划”、“杰青”、“863”重点项目、“973”项目的资助！

感谢夏建白院士、郑厚植院士、李树深院士、浙师大吴锋民校长、浙江东晶电子李庆跃董事长、国防科大秦石乔院长、常胜利所长的支持、关心和帮助！

感谢所有合作者的真诚付出！

感谢课题组成员的不懈努力！

特别是小组成员：

（博士后）王治国、孟秀清、石丽洁、唐黎民、王静、王美丽、邵铮铮、黄长刚、赵尚武、杨圣雪、夏庆林、李昊峰

（博士生）彭浩为、盖艳琴、许强、王飞、段宜峰、方志杰、邓惠雄、朱峰、董珊、董华锋、李冲、承刚、何朝晖、刘洪飞、康俊、王治、陈章辉、裴洋、李仁雄、霍能杰、刘建哲、李燕、杨钰晗、鹿方圆、胡波、陈卉

（硕士生）刘超人、杨冠东、陈伟槟、王岩、肖成、杜元宝、韩聪、王小周、黎博、黎永涛、黄乐



中国科学院半导体研究所
Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences

