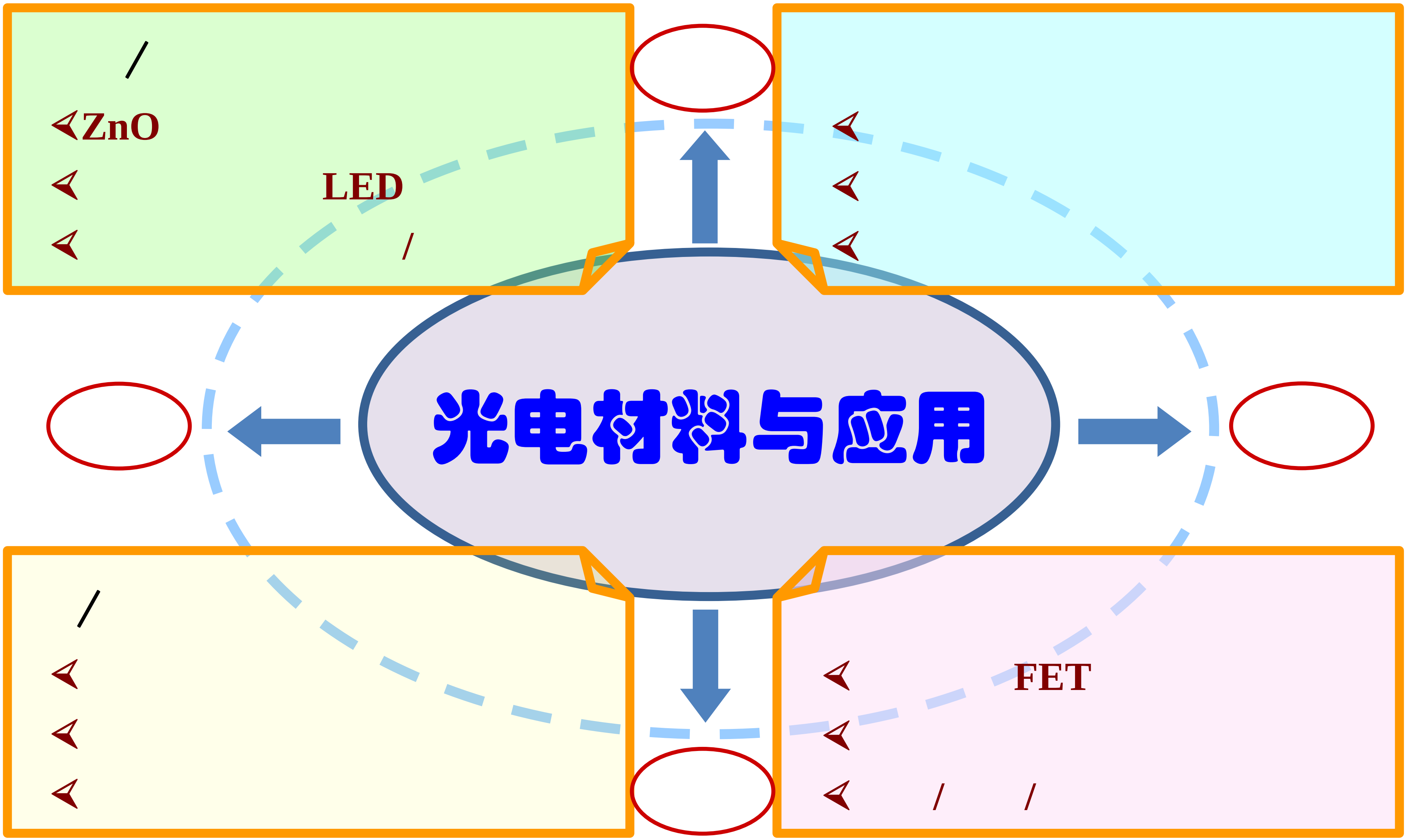
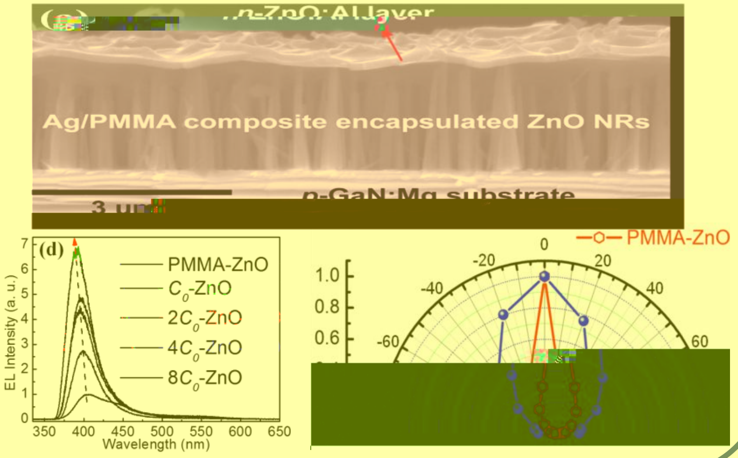
ZnO

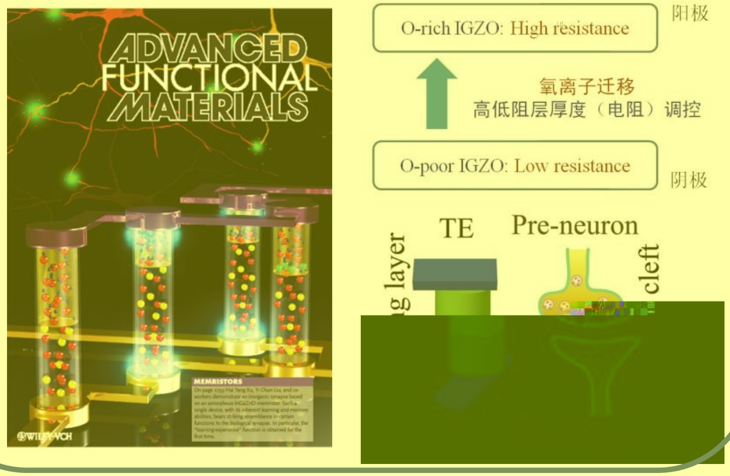
研究方向

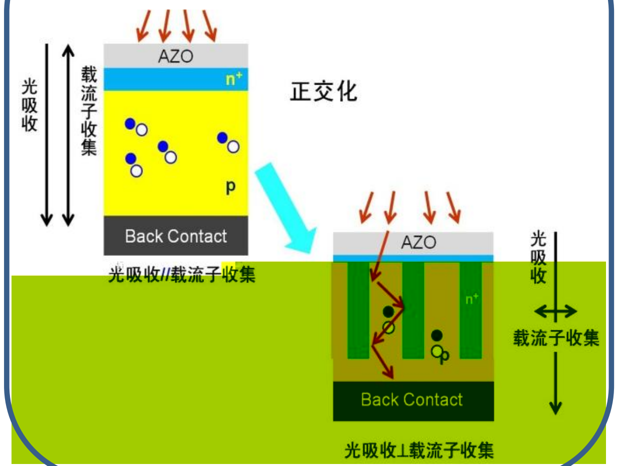


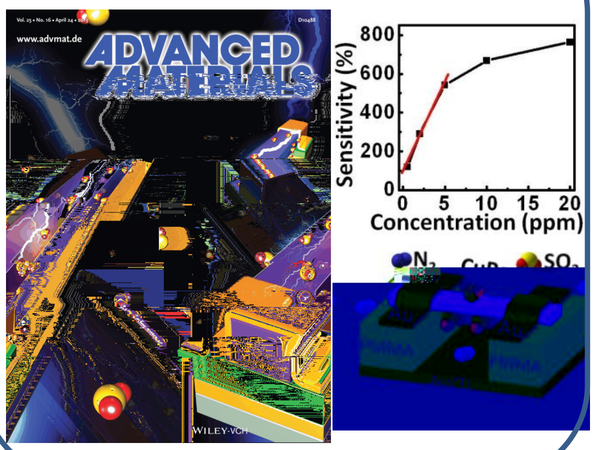
研究方向

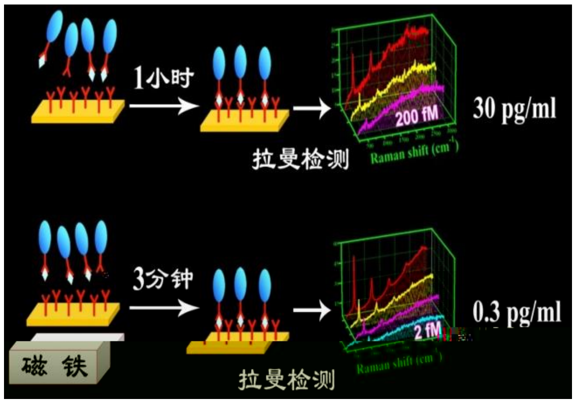
纳米材料——优异的光/电特性，独特的物理/化学性质











内容提纲

ZnO LED/LD

❖

❖

LED/LD

ZnO

❖

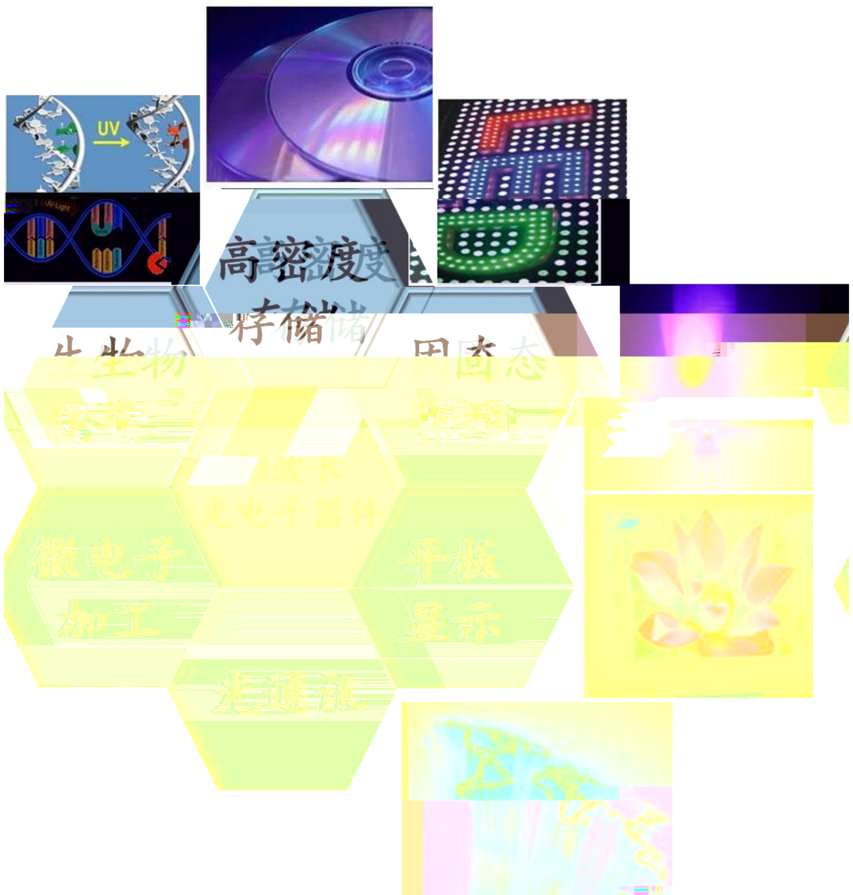
❖

ZnO ---

ZnO

研究背景

短波长光发射器件



研究背景

研究目标:

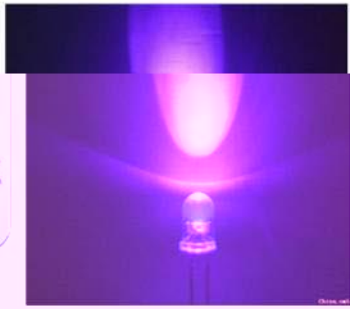
同质结器件:

1. p-type ZnO 稳定性、可重复性

2. p-type ZnO 质量，缺陷发射为主降低紫外效率

高效、稳定

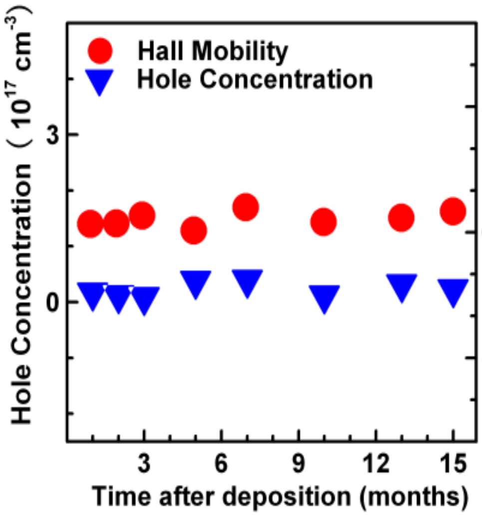
ZnO紫外LED/LD

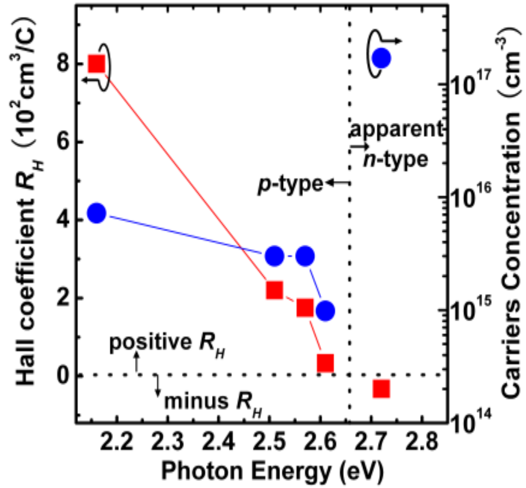


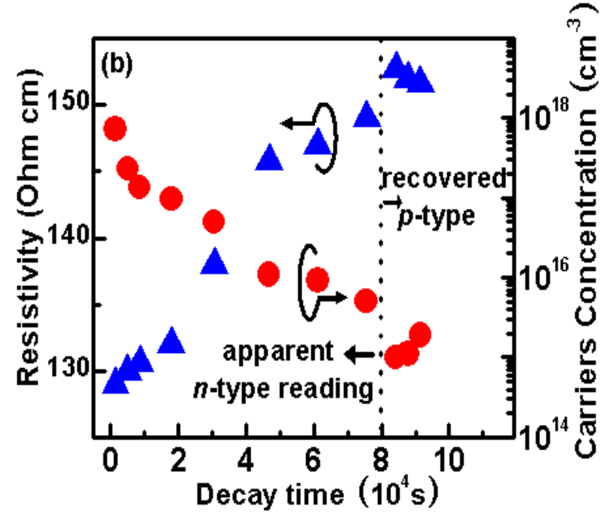
P-type

Stability of p-type ZnO

Photo-irradiation

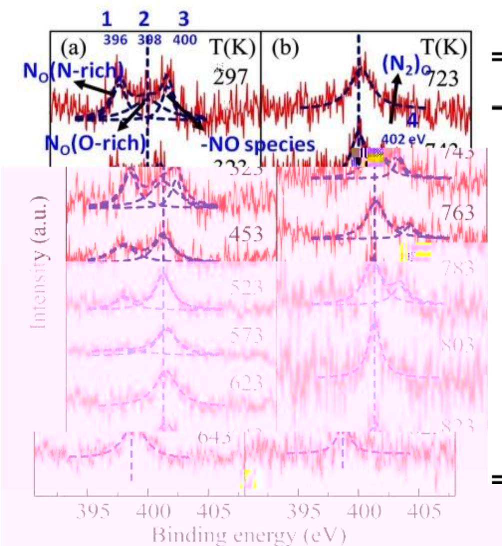




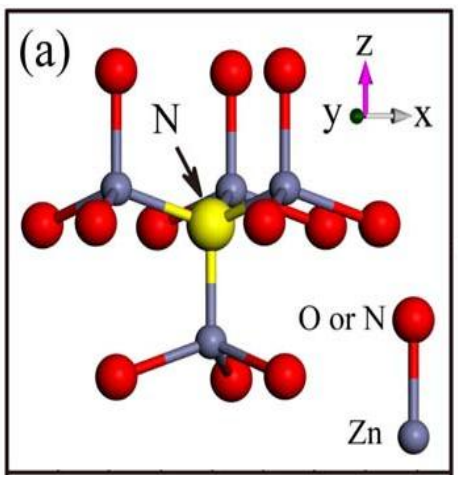


Appl. Phys. Lett. 92, 052106 (2008)

Thermal

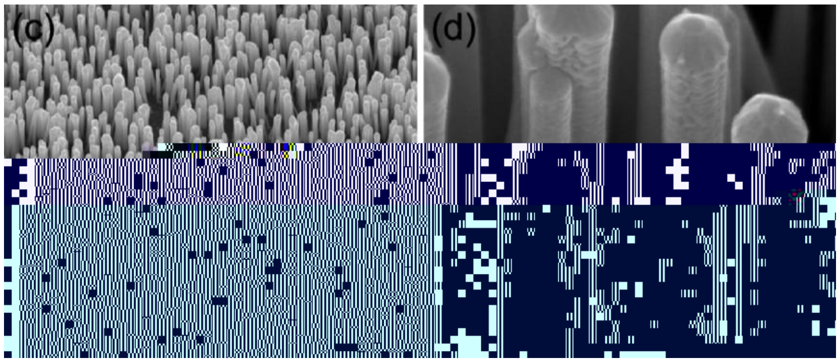


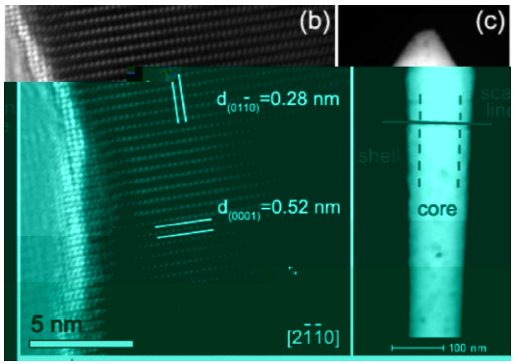
Peak	N 1s	assignment (reference)	Our assignment	Stabilities
1	~396 eV	N-Zn bond or N_O [7-11], polarized triply bounded CN[16], N-O[17]	N-Zn at *nitrogen rich* environment	unstable
2	~398 eV	N-Zn bond or N_O [2, 13,14,16-18], C-N species [7], N-H [9,10]	N-Zn at *oxygen rich* environment	Stable to 723 K
3	~400 eV	C-N species [7, 10, 16], N-H [13,14,16], oxynitride [8]	-NO species	unstable
4	~402 eV	$(N_2)_O$ [7, 10, 14, 16], nitrite [2, 8]	$(N_2)_O$	unstable

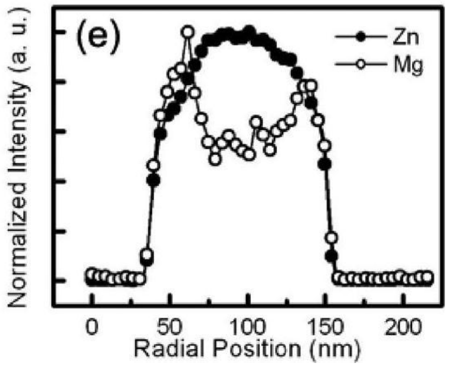


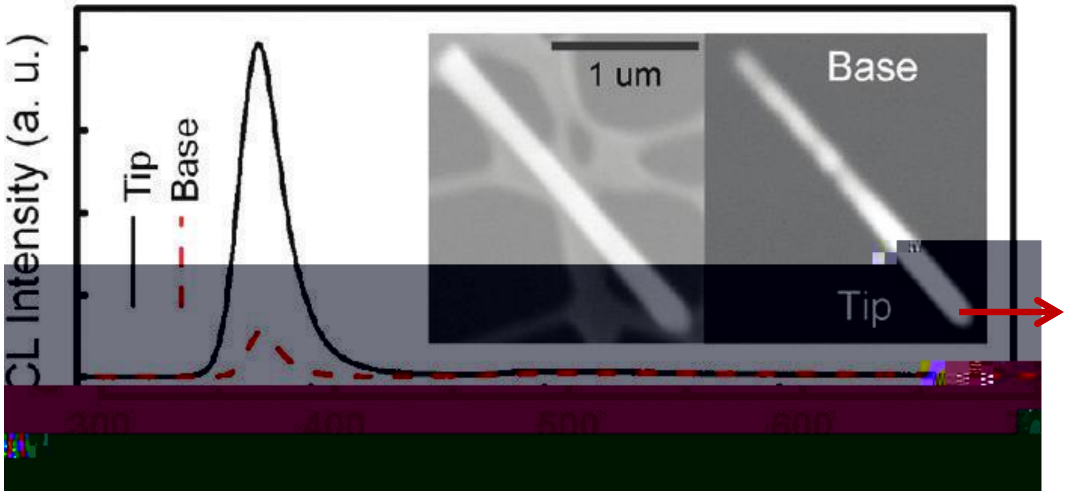
Appl. Phys. Lett. 95, 191903 (2009)

研究工作--ZnO纳米线异质结构

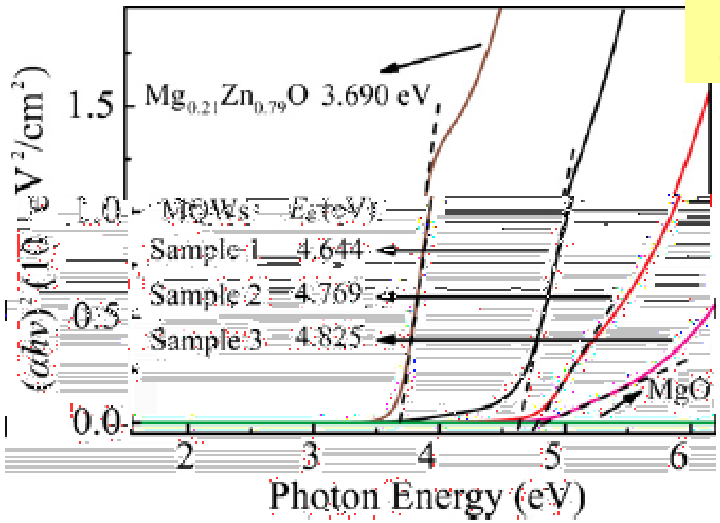


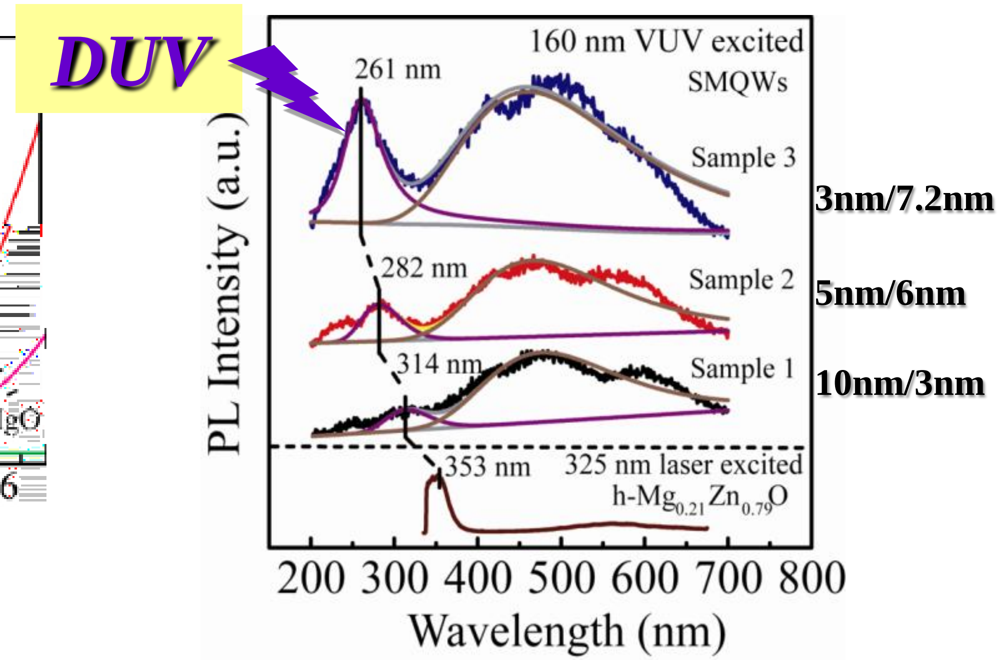






研究工作--ZnO纳米线异质结构





$$\boxed{\Delta E_{\text{stress}} = \beta\sigma}$$

Sample	a (Å)	α (°)	d_{eff} (Å)	σ (GPa)	ΔE_s (meV)	ΔE_{stress} (meV)
859	1	4.261	88.74	2.980	31.7	934
913	2	4.249	88.60	2.967	33.7	1079
921	3	4.244	88.66	2.965	34.0	1135

Appl. Phys. Lett. 102, 031905 (2013)
J. Alloy. Compd. 513, 399 (2012)

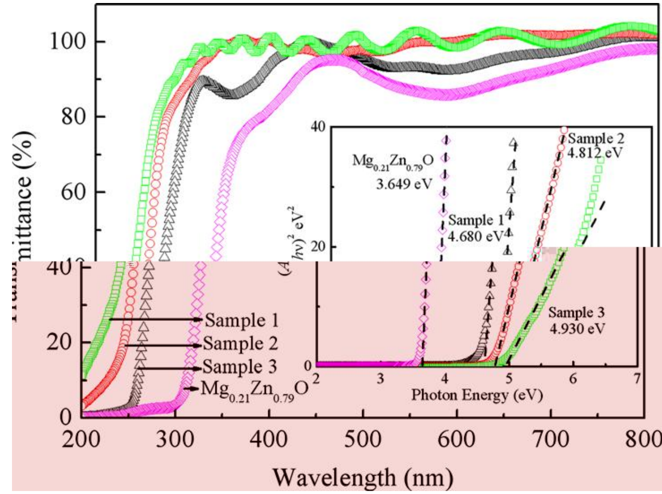
研究工作--ZnO纳米线异质结构

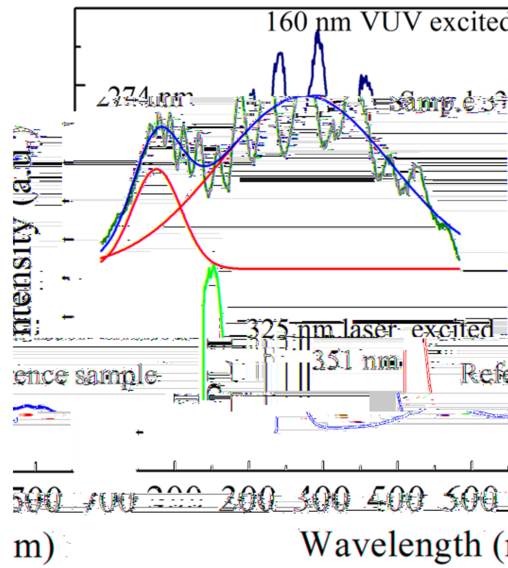
$$\frac{1}{d^2_{(hkl)}} = \frac{h^2 + k^2 - 2hk\cos\gamma}{a^2 \sin^2\gamma} + \frac{l^2}{c^2}$$

$$\sigma = -\frac{Y}{\nu}\frac{d_{(\mathrm{hkl})} - d'_{(\mathrm{hkl})}}{d'_{(\mathrm{hkl})}}$$

$$E_{\mathrm{stress}} = a_0\ (\ln V - \ln V_0)$$

Sample	*a* /Å	*c* /Å	/ Å	E_g /meV	E_{stress} /meV
1	4.255	4.190	88.76	1031	184
2	4.244	4.174	88.66	1163	257
3	4.232	4.140	88.44	1281	370





[Appl. Phys. Lett. 102, 031905 (2013)]

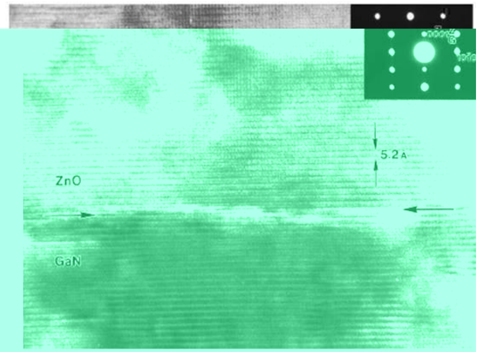
[J. Alloy. Compd. 513, 399 (2012)]

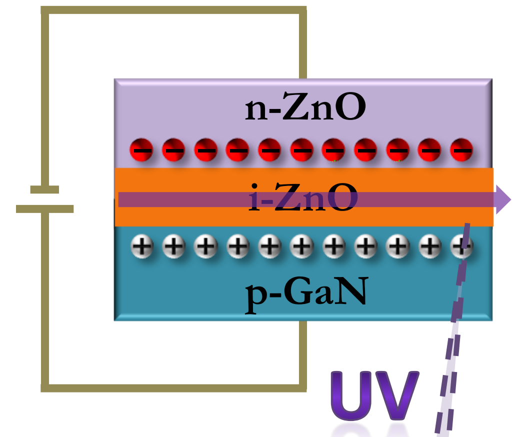
研究工作--平面LED器件

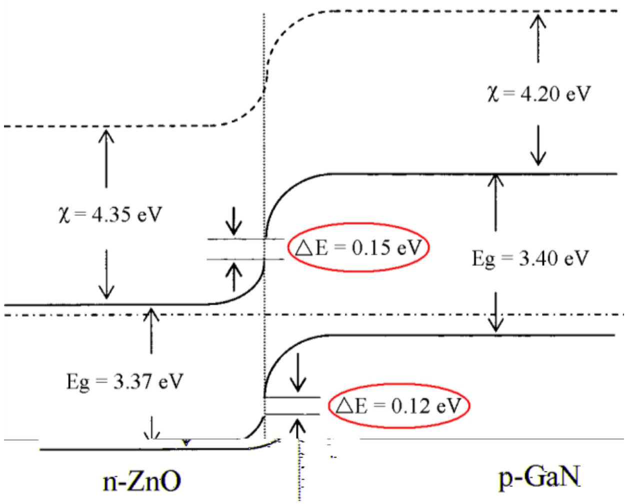
p-GaN/i-ZnO/n-ZnO 异质结ZnO UV LEDs

***p*-type: Si, NiO, GaN, organics, etc.**

material	ZnO	GaN
crystal structure	wurtzite	wurtzite
lattice constant (nm)	a=0.325 c=0.521	a=0.319 c=0.519
band gap (eV)	3.37	3.39
lattice mismatch	1.9%	



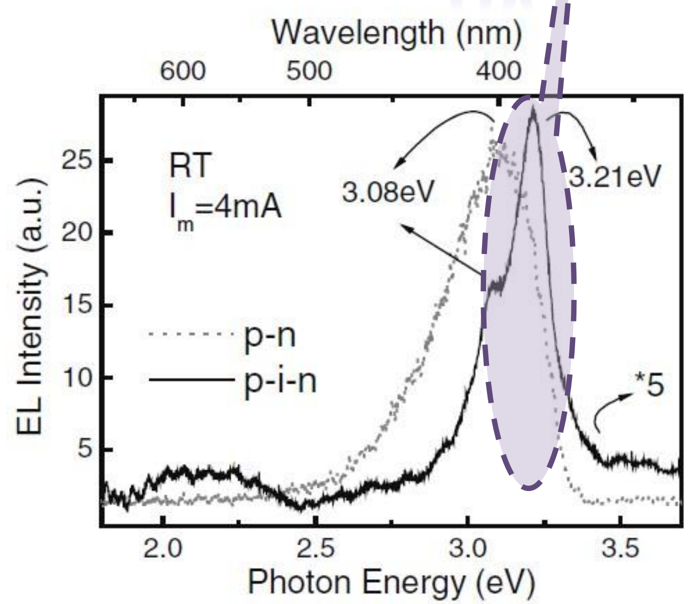




导带失配和价带失配近似相等

电子和空穴克服相近势垒实现注入

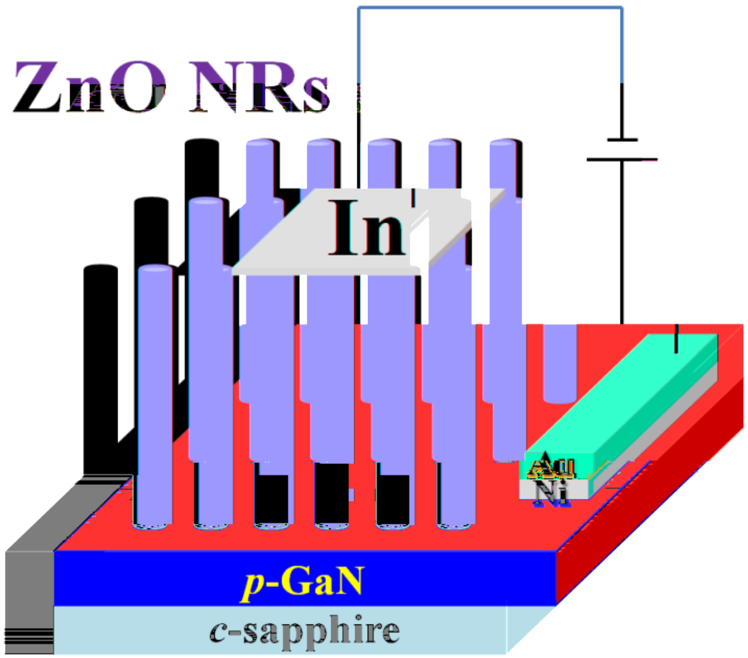
电子迁移率高于空穴，ZnO电子向GaN注入并辐射复合产生GaN发射

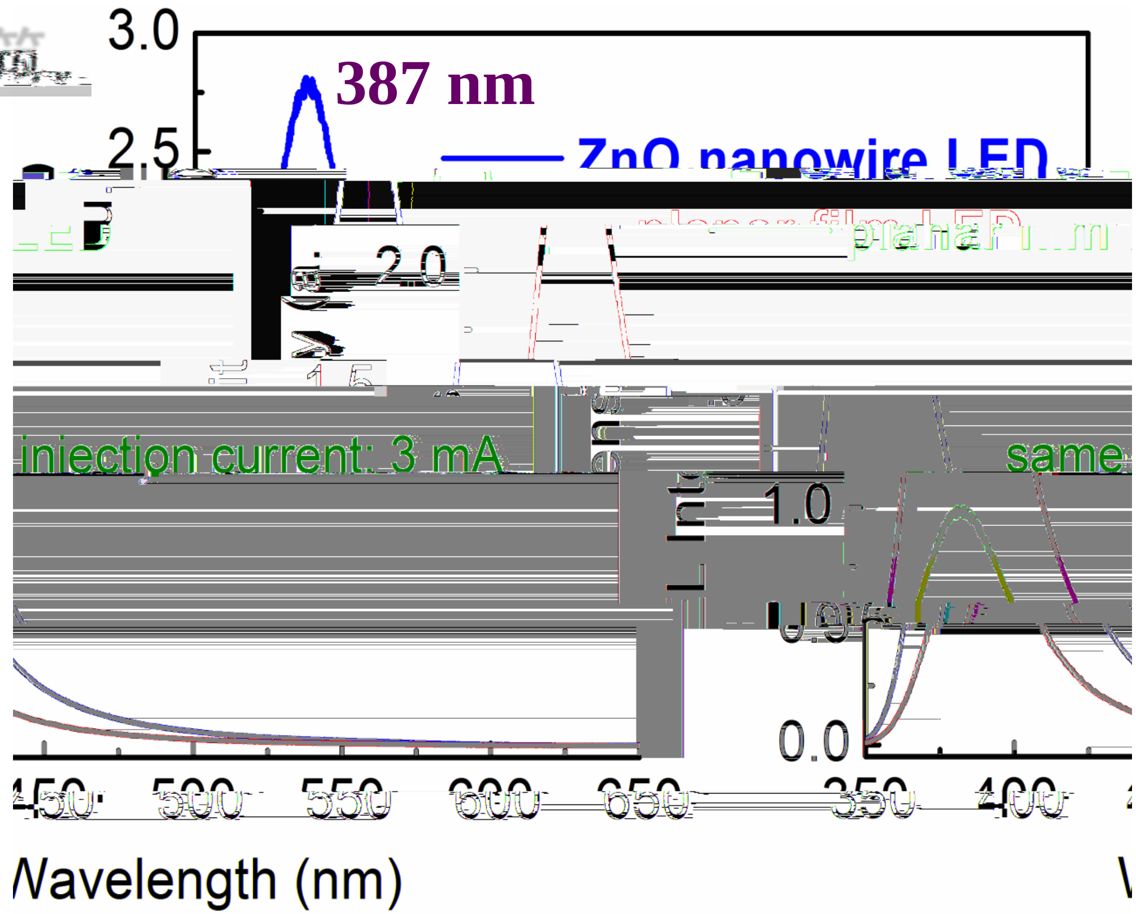


Appl. Phys. B 80, 871 (2005)

研究工作--纳米线LED器件

ZnO 纳米线 UV LED的构筑





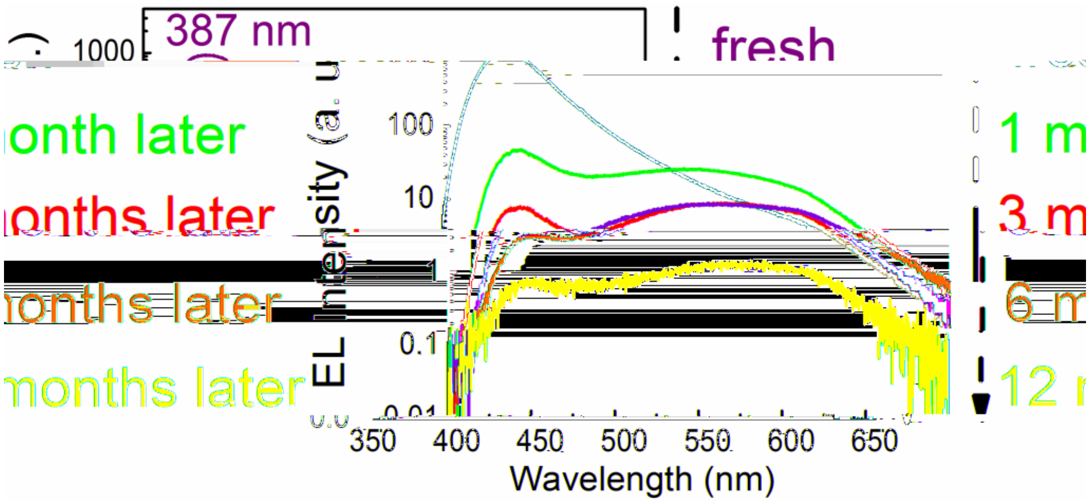
LED,

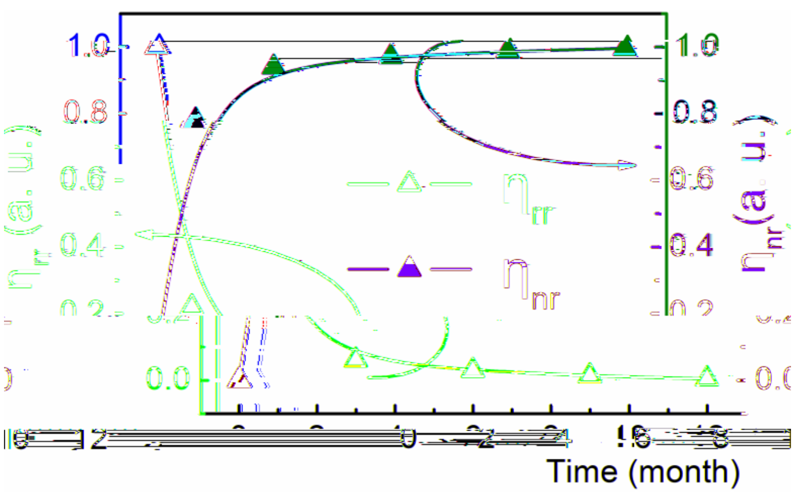
1.
2.
3.

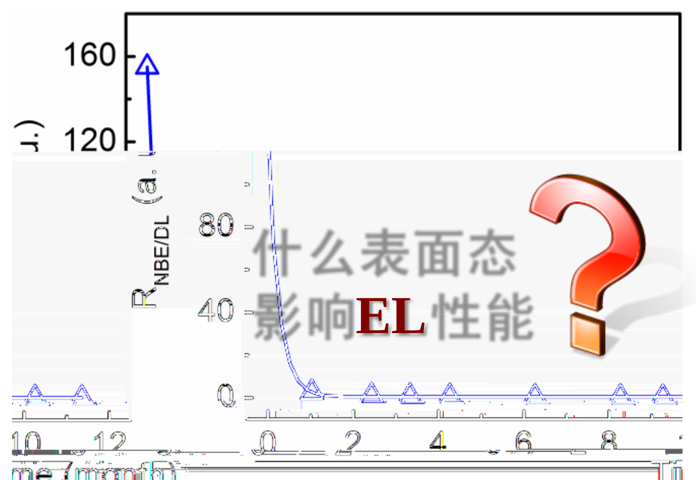
Appl. Phys. Lett. 100, 203101 (2012)

研究工作--纳米线LED器件稳定性

ZnO 纳米线 LED的稳定性？

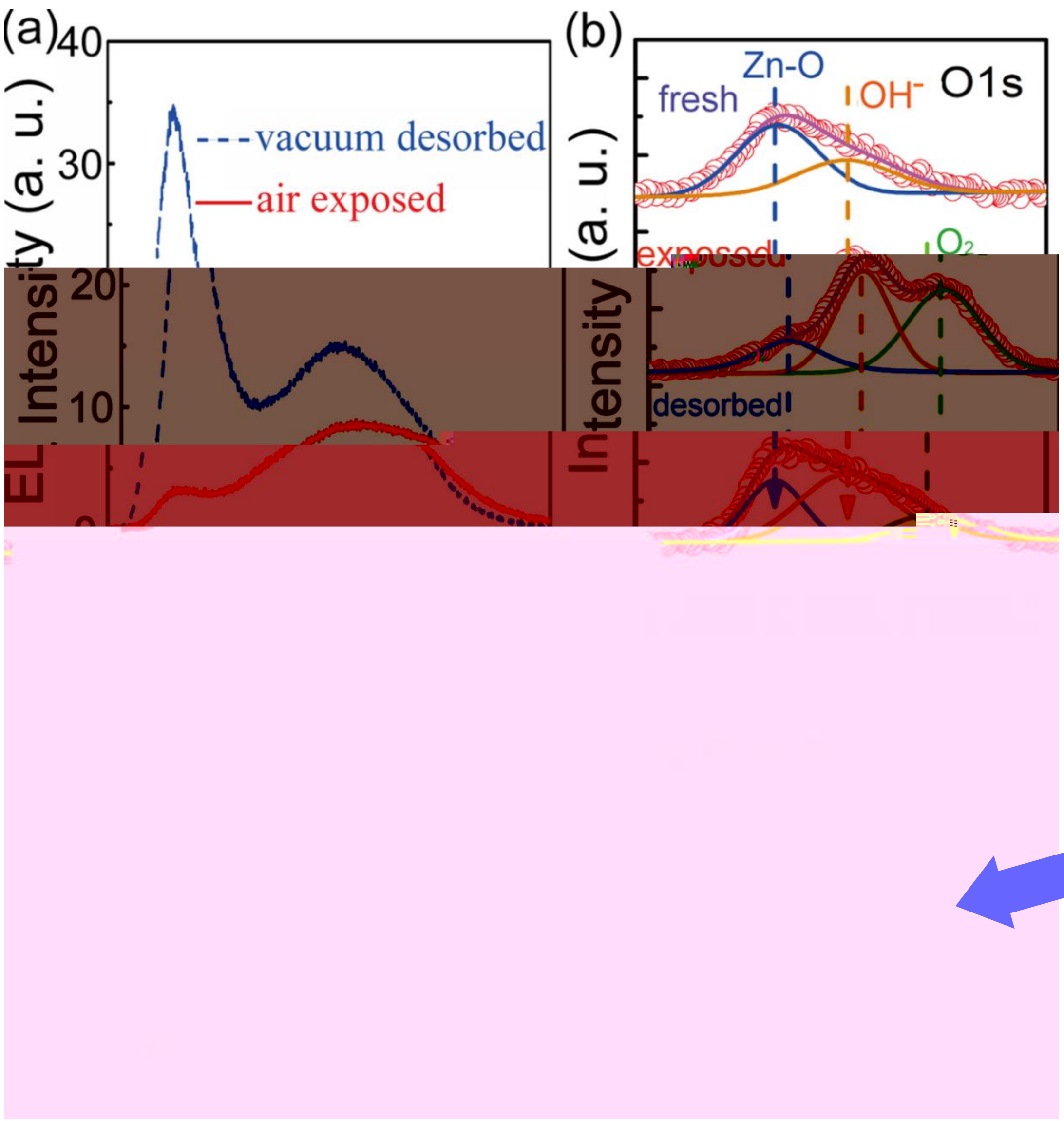






[Appl. Phys. Lett. 100, 203101 (2012)]

研究工作--器件：纳米线器件稳定性

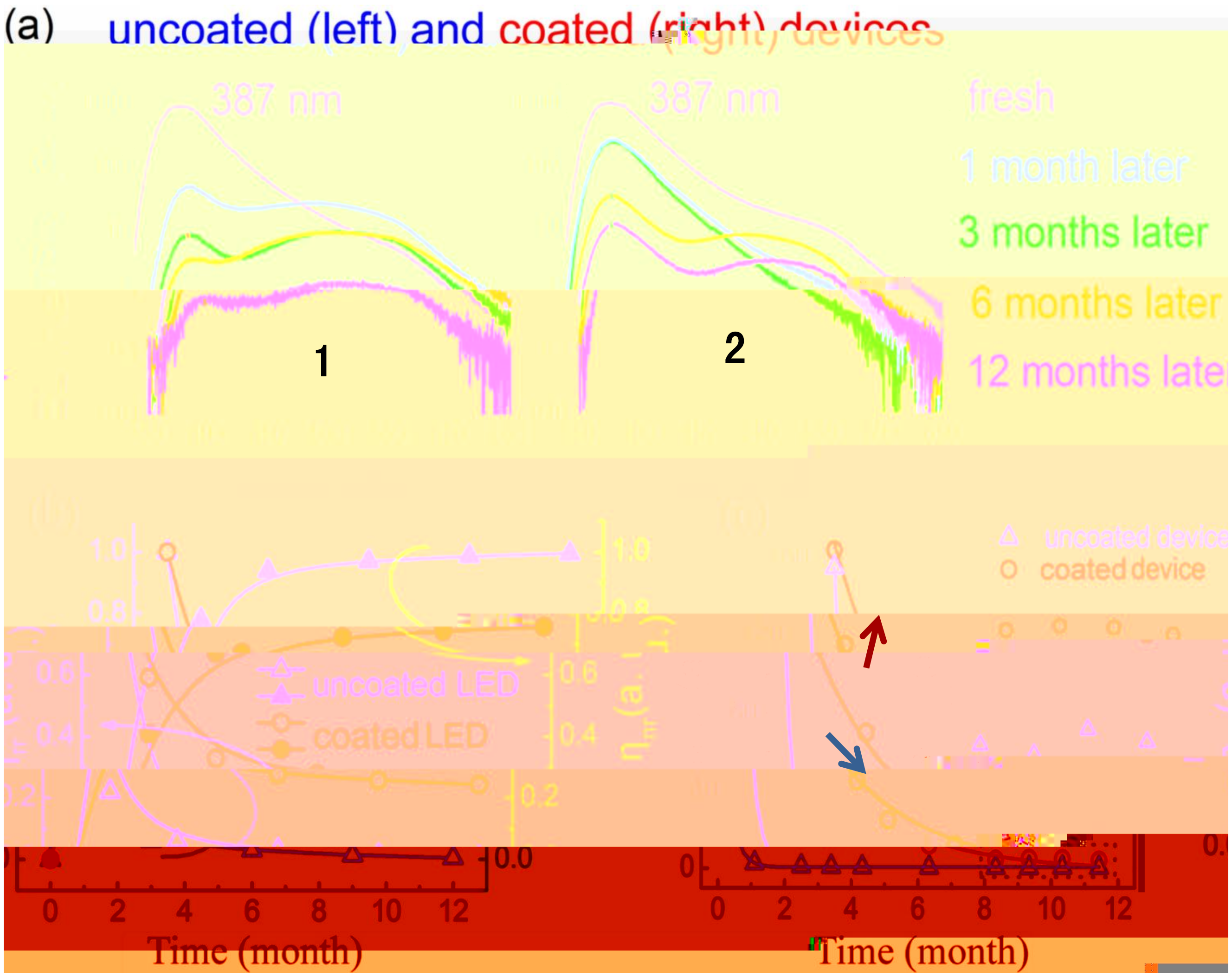


XPS
O_2
OH^-

Media for Non-radiative & Deep-level Recombinations

Appl. Phys. Lett. 100, 203101 (2012)

研究工作--纳米线LED器件稳定性改进



2 1

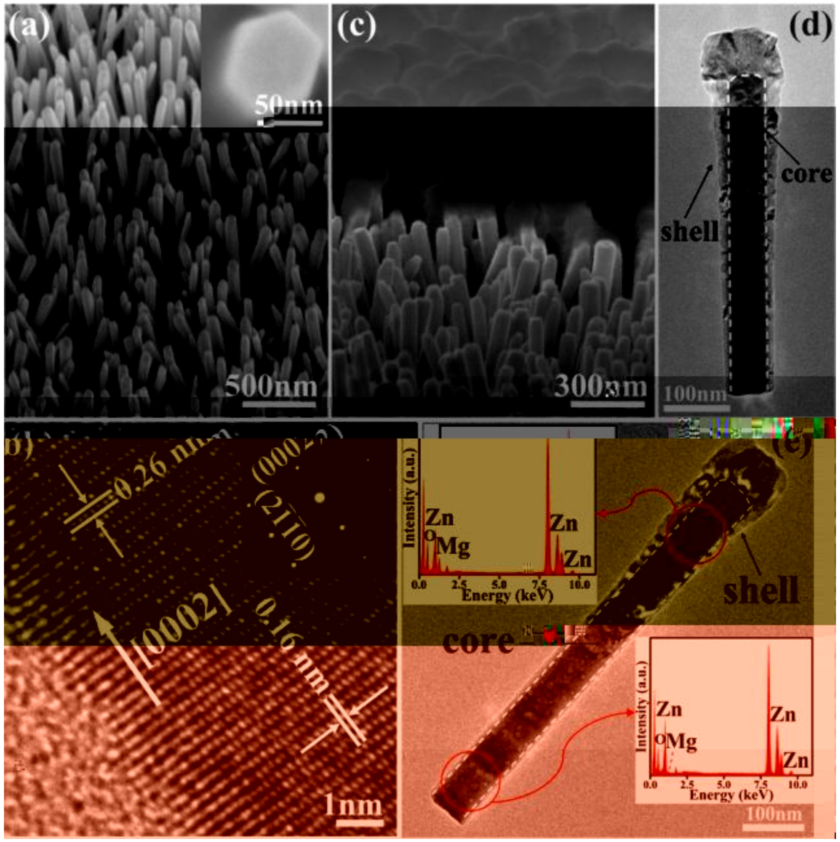
/

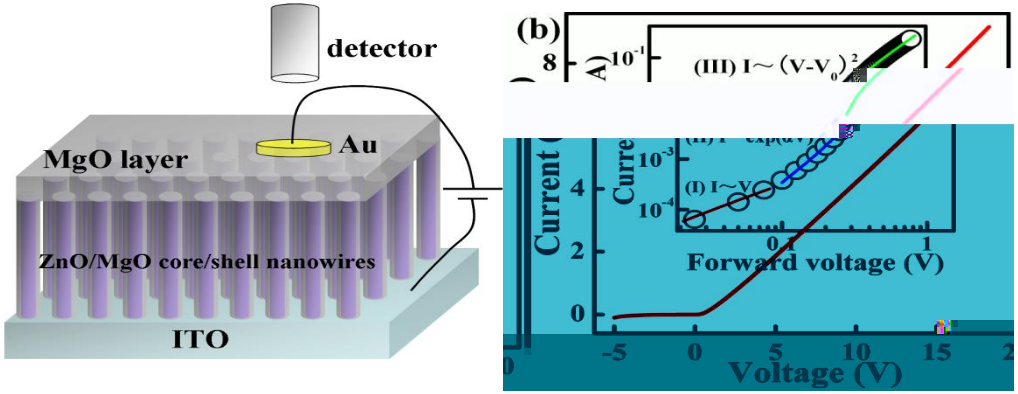
2 1

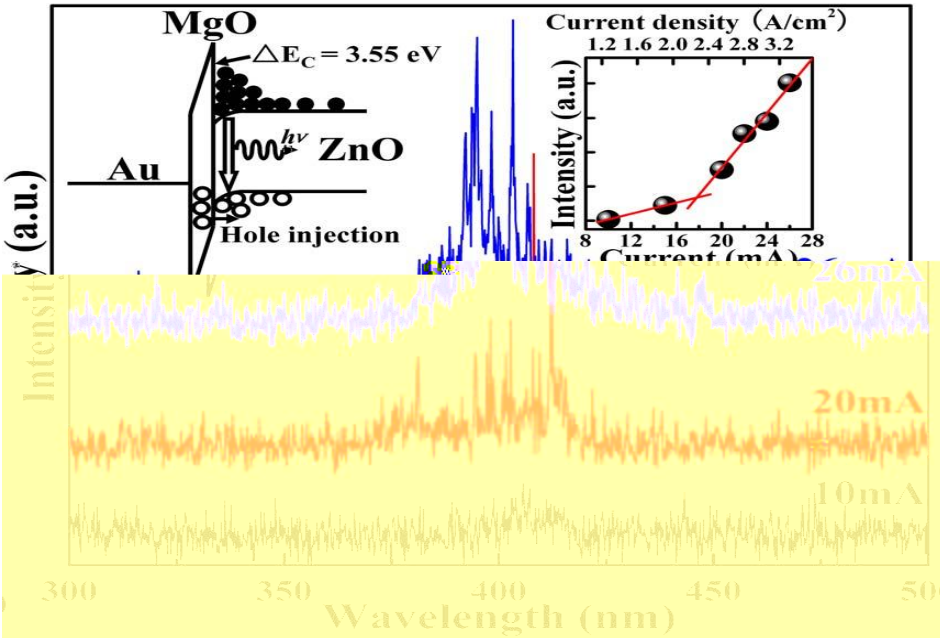
[Appl. Phys. Lett. 100, 203101 (2012)]()

研究工作--纳米线LD器件

ZnO/MgO核壳纳米线MIS异质结LD







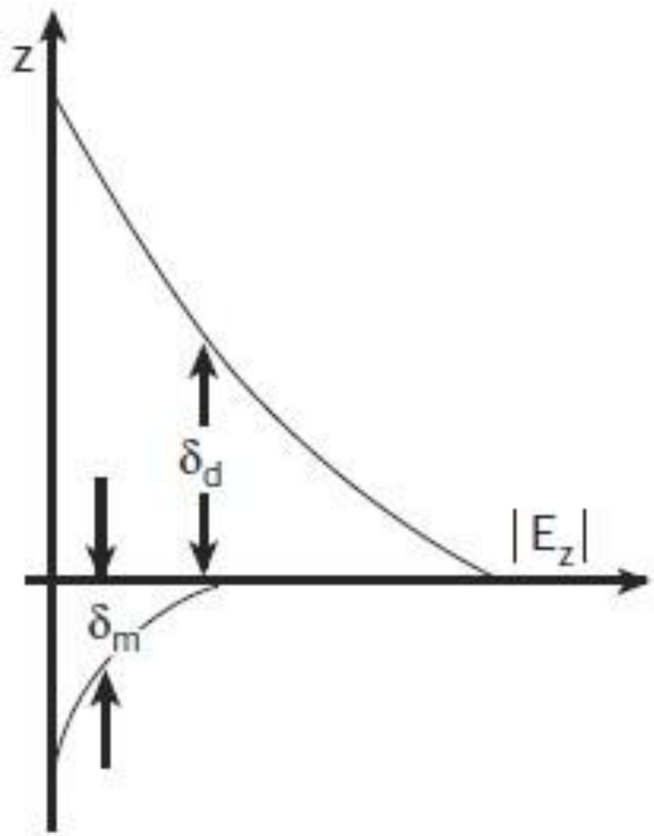
与薄膜器件相比：较低激射阈值

较高发射效率

Appl. Phys. Lett. 99, 063115 (2011)

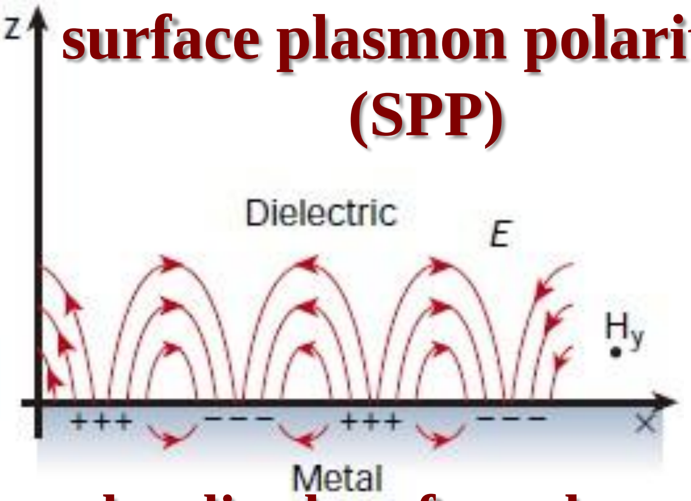
研究工作--LSP增强型LED器件

Surface Plasmon: collective oscillation mode of electrons at metal/dielectric interface

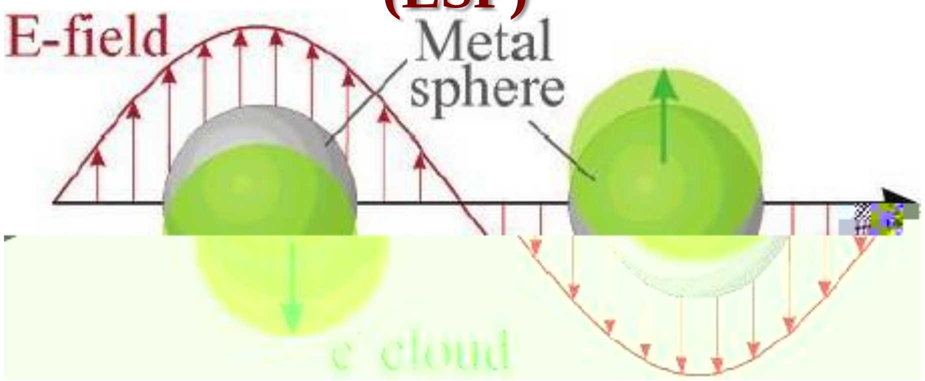


Evanescent wave:
Decay with the distance from the metal surface

surface plasmon polariton (SPP)



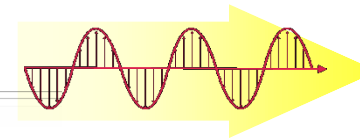
localized surface plasmon (LSP)

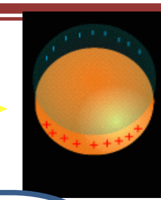


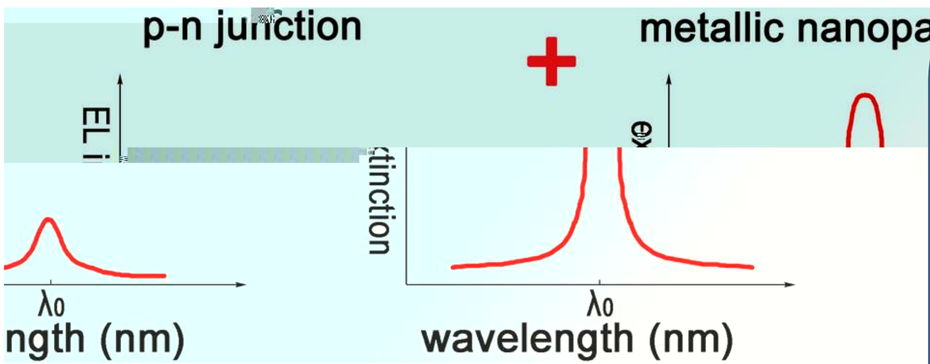
Spectral enhancement: fluorescence spectrum, Raman spectrum and nonlinear optical effect.

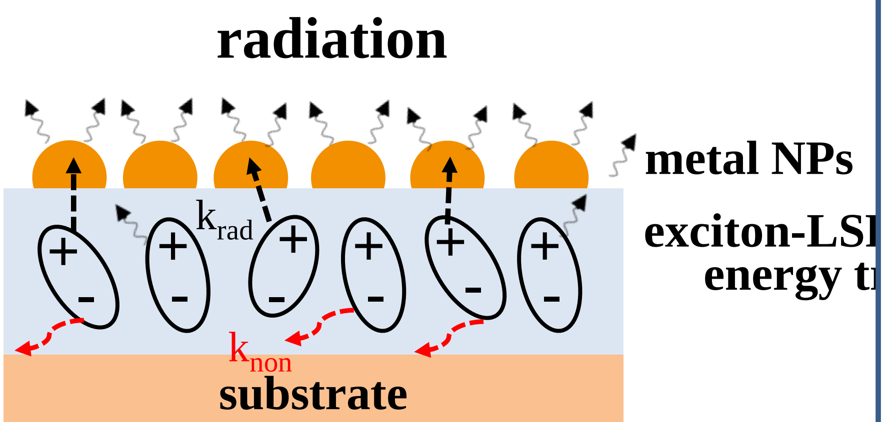
研究工作--器件：LSP增强型LED器件

Mechanism for EL Enhancement









LSP-enhanced ZnO UV LED

Metal LSP + ZnO-based LED

Internal quantum efficiency (IQE)

+

Light extraction efficiency (LEE)

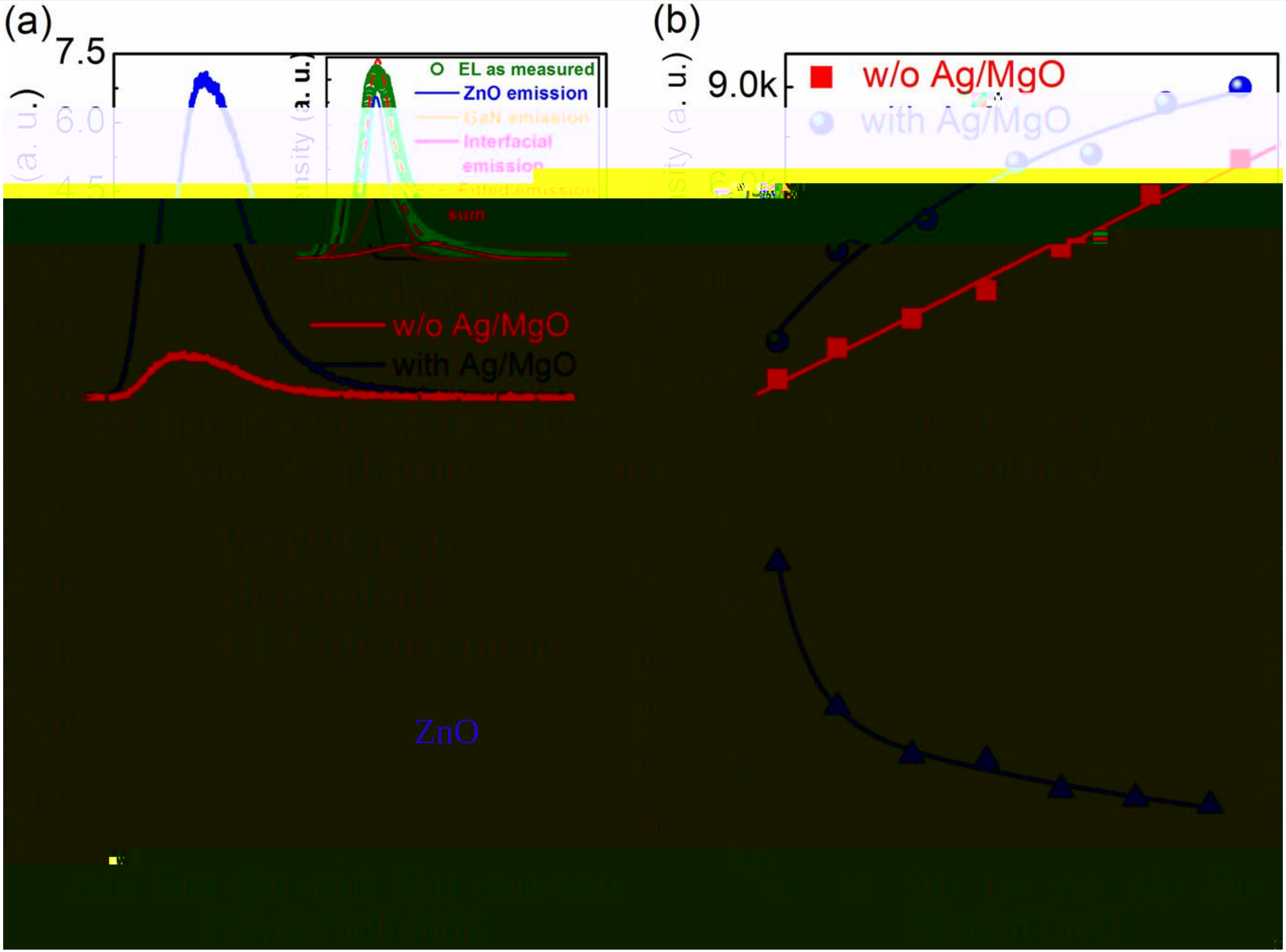
Enhanced EL performance

1.

FRET

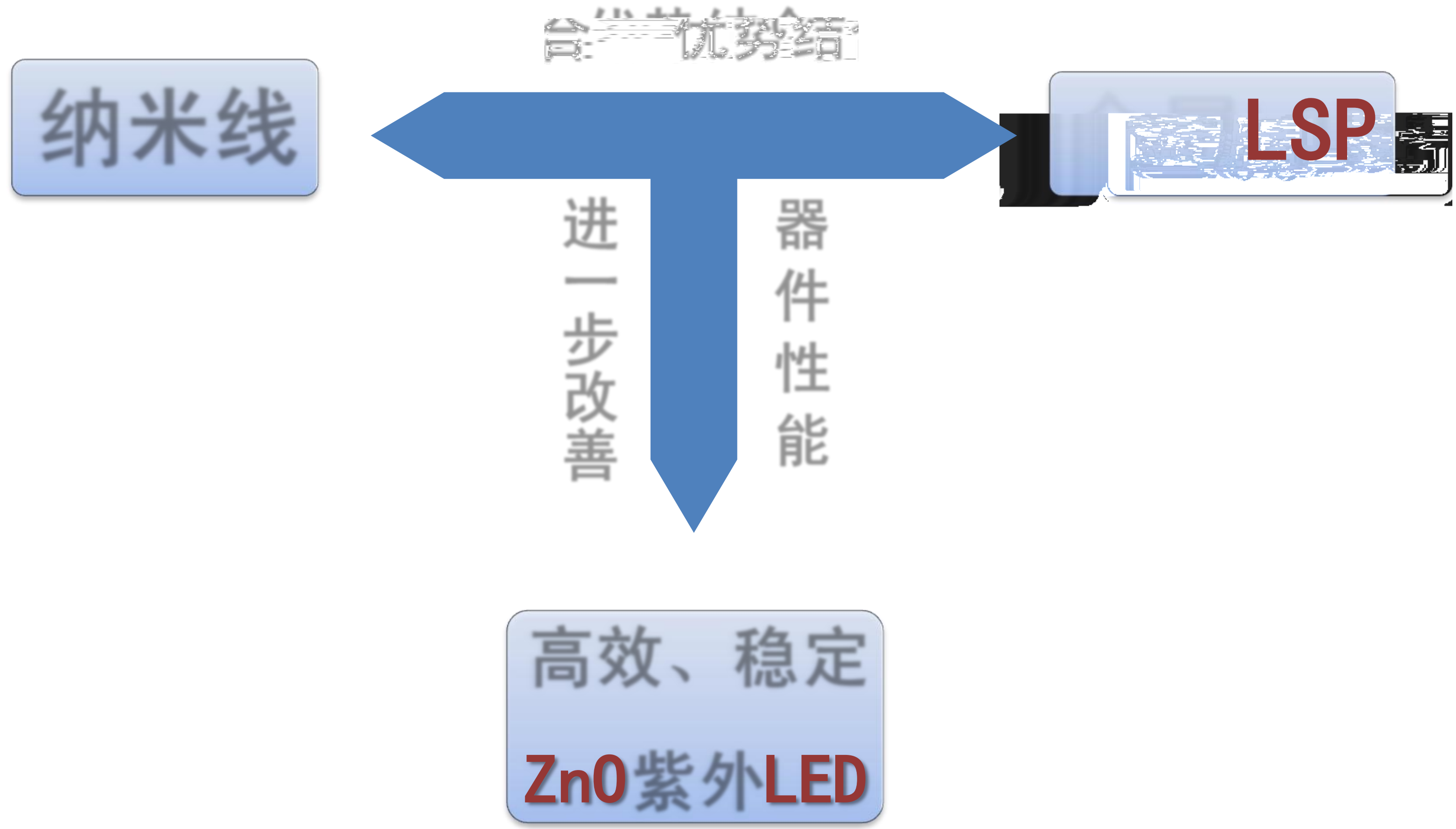
Appl. Phys. Lett. 101, 142101 (2012)

研究工作--LSP增强型[illegible]LED器件



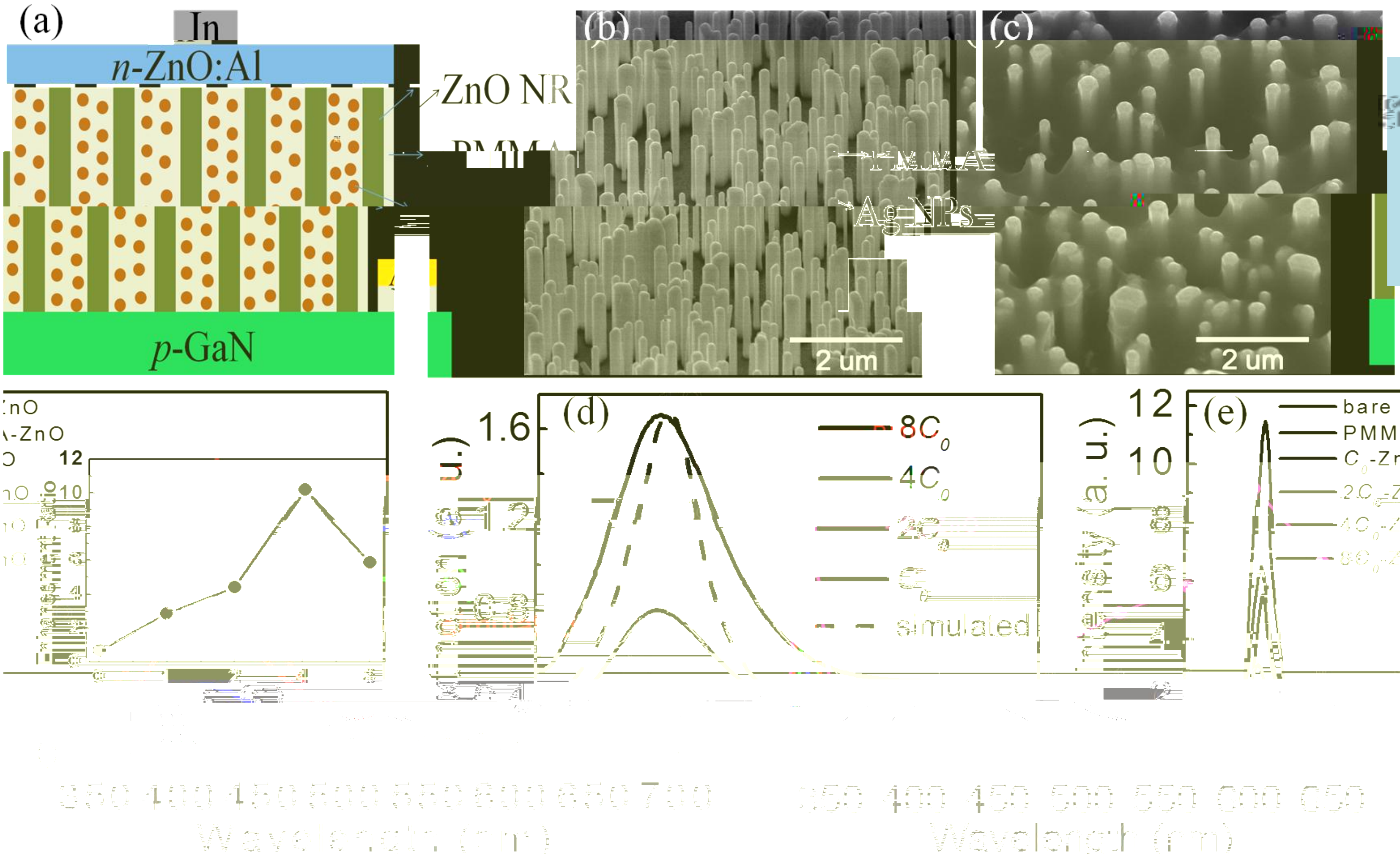
Appl. Phys. Lett. 101, 142101 (2012)

研究工作--LSP增强型、纳米线LED器件



研究工作--LSP增强型、纳米线LED器件

Ag纳米粒子LSP增强的 ZnO纳米柱阵列LED



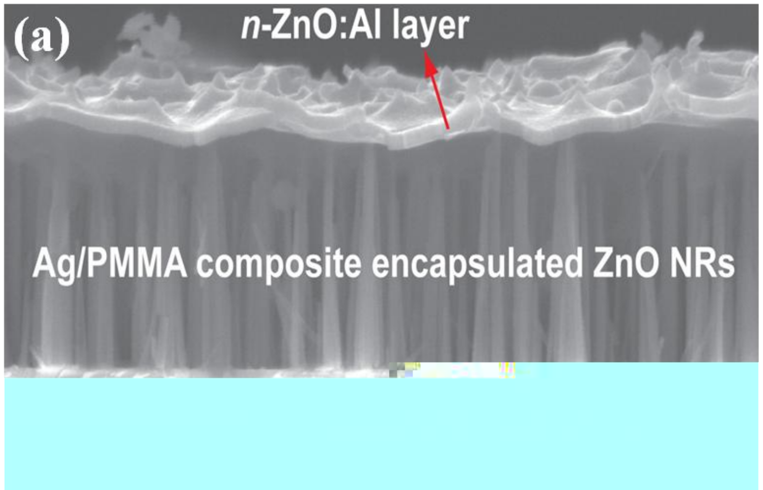
复合物封装ZnO纳米柱阵列

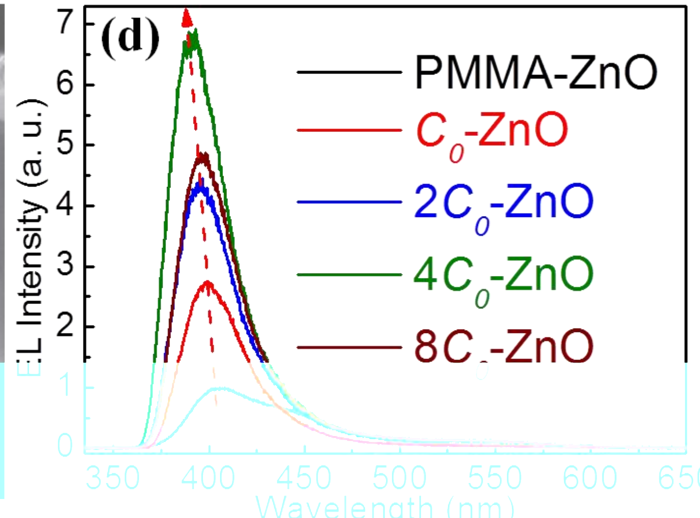
不同浓度Ag粒子消光谱

优化浓度，PL最大11倍增强

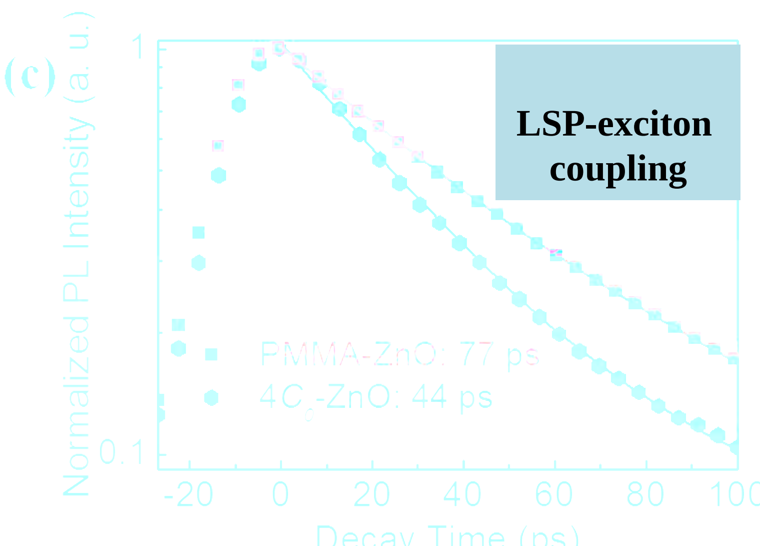
研究工作--器件：LSP增强型、纳米线LED器件

Exciton-LSP 近场耦合增强ZnO近带边EL





7
EL



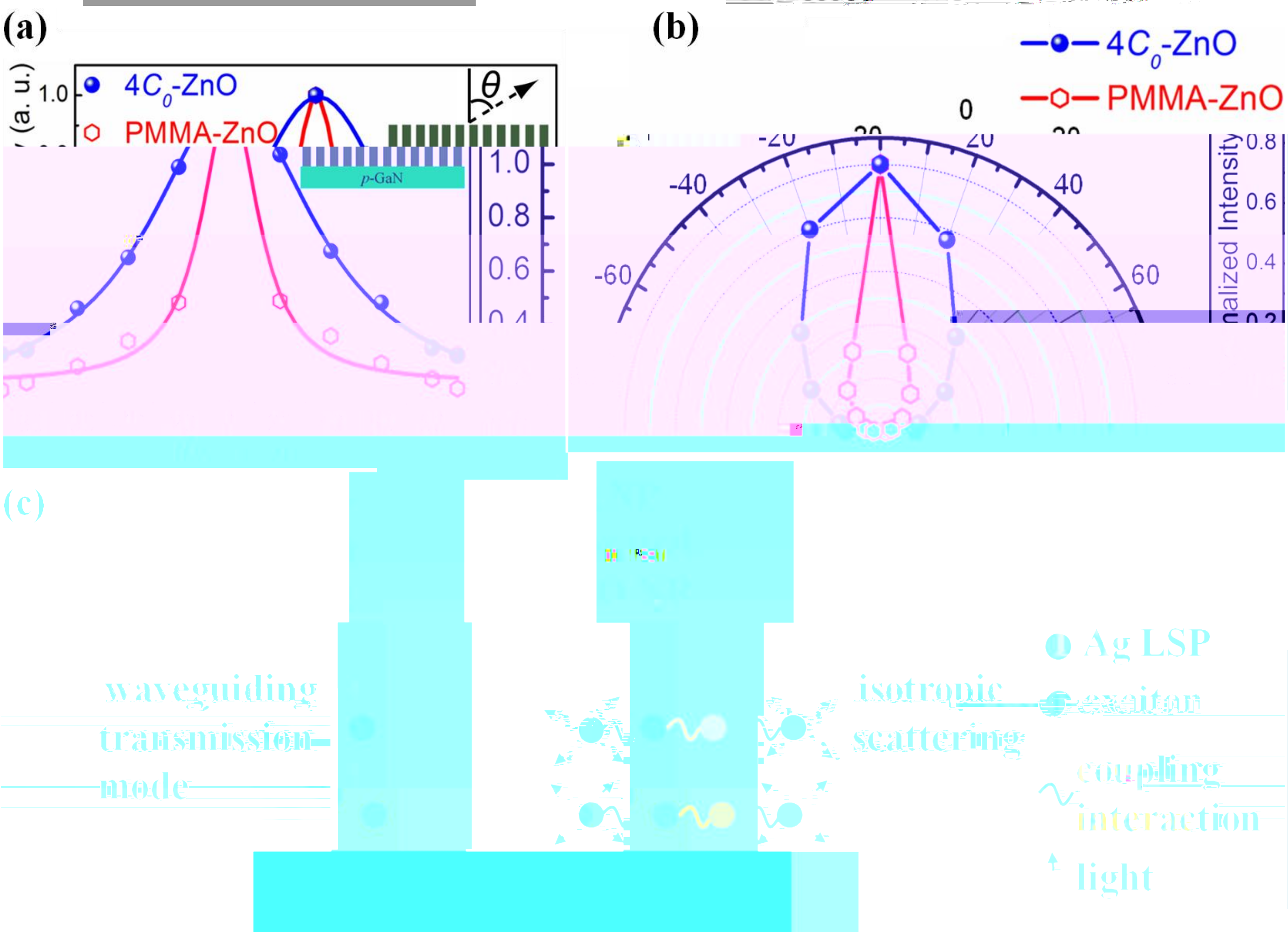
LSP-exciton coupling

ZnO

Nanoscale 5, 8634 (2013)

研究工作--器件：LSP增强型、纳米线LED器件

EL 空间分布属性：LSP-exciton coupling, LSP isotropic scattering



Destruction of waveguiding-type EL transportation mode in NRs

研究背景

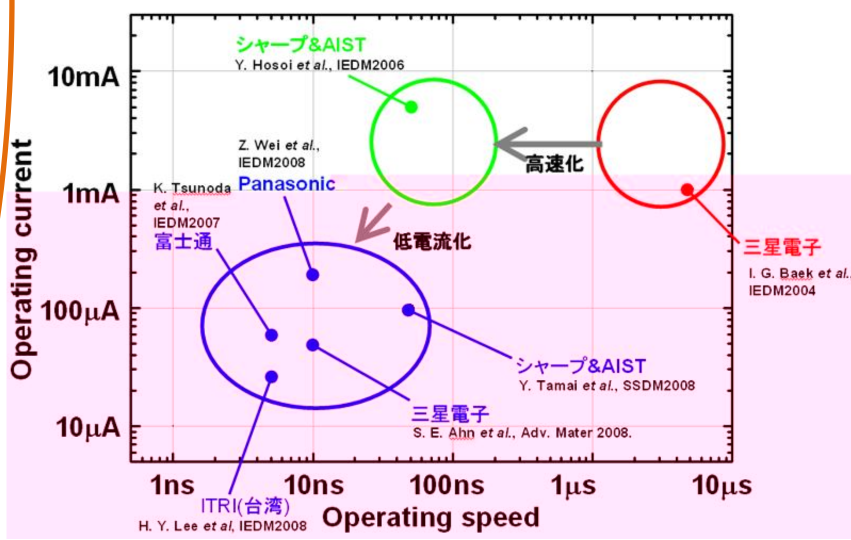
Resistive random-access memory (RRAM or ReRAM)

--- **FeRAM MRAM PCRAM RRAM**

存储器类型	NOR 闪存	NAND 闪存	铁电存储器	磁阻存储器	相变存储器	阻变存储器
单元元件	1T	1T	1T1C	1T1R	1T1R	1T1R/1D1R
单元面积	9-11F^2	5F^2	12-22F^2	6-16F^2	5-16F^2	5-8F^2
读电压	2V	2v	0.9v-3.3v	1.5v	3v	0.4v
读时间	10ns	50ns	45ns	20ns	60ns	<10ns
写电压	7-9v	15v	0.9-3.3v	1.5v	3v	0.5v-1v
写时间	1us/10ms	1ms/0.1ms	10ns	20ns	50/120ns	5-10ns
写能量	>1e-14	>1e-14	>3e-14	>1.5e-10	>6e-12	>1e-12
读写次数	>1e5	>1e5	>1e14	>1e16	>1e9	>1e6
保持时间	10 年	10 年	10 年	10 年	10 年	10 年
评论	/	/	与 CMOS 工艺不兼容，存储密度较小	与 CMOS 工艺不兼容，写操作功耗大	与 CMOS 工艺不兼容，写操作功耗大	与 CMOS 兼容性好，研究时间短，物理机理不明确

Parameter	Typical Flash	Target values
Switching element size (nm)	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

RRAMの動作特性 (動作電流・速度)



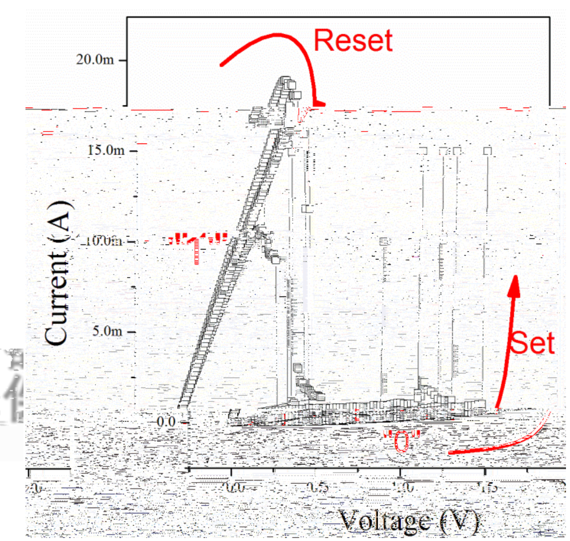
研究工作-ZnO基忆阻器件

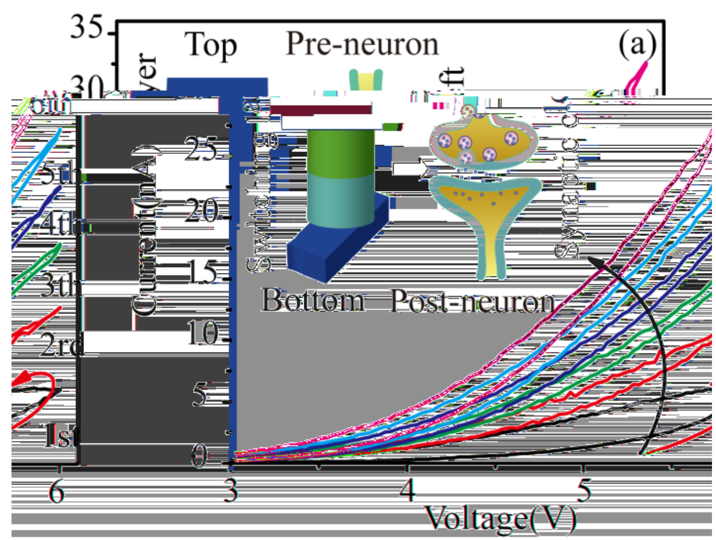
ZnO材料：

忆阻器件

- 间断阻变(高低阻) — 阻变存储器(RRAM)
- 连续阻变 — 神经突触仿生器件

RRAM

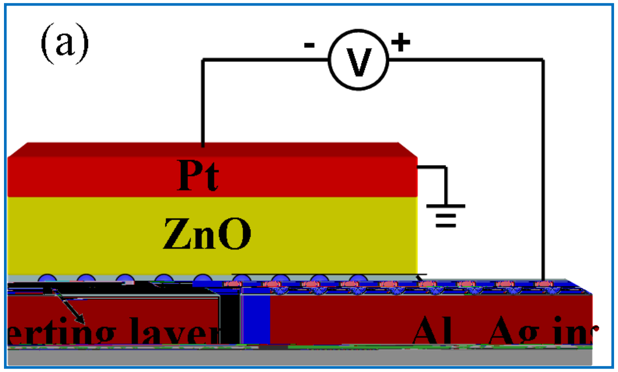


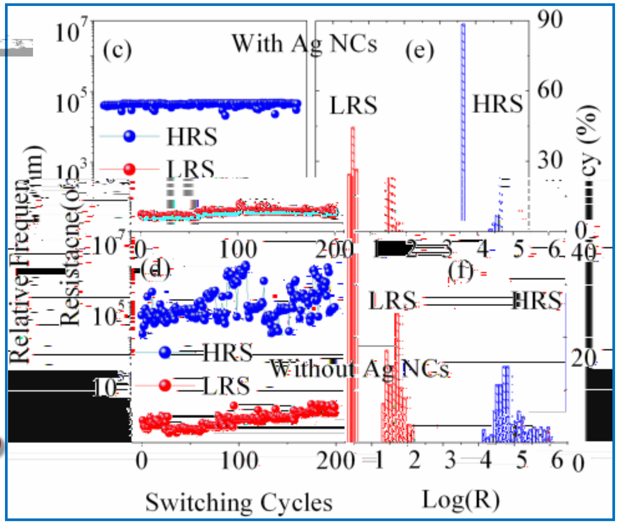


神经突触仿生器件

研究工作——高速ZnO RRAM器件

引入Ag纳米晶层 ⟶ 参数均一 + 高速转变(20ns/30ns)



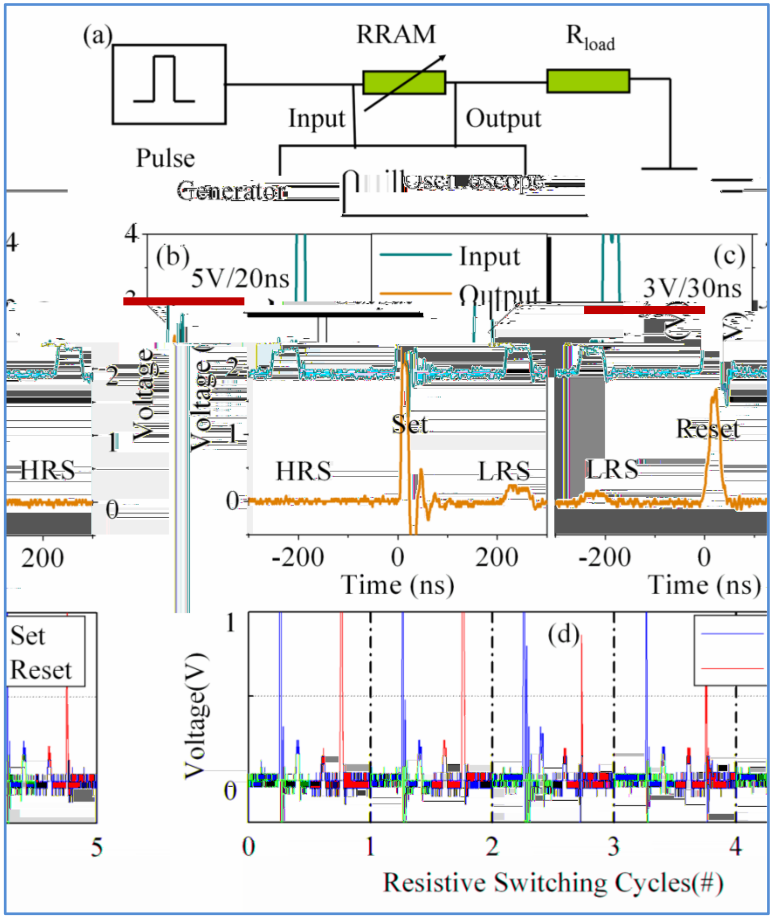


降低
高低阻波动

10%,17%

↑

138%, 48%

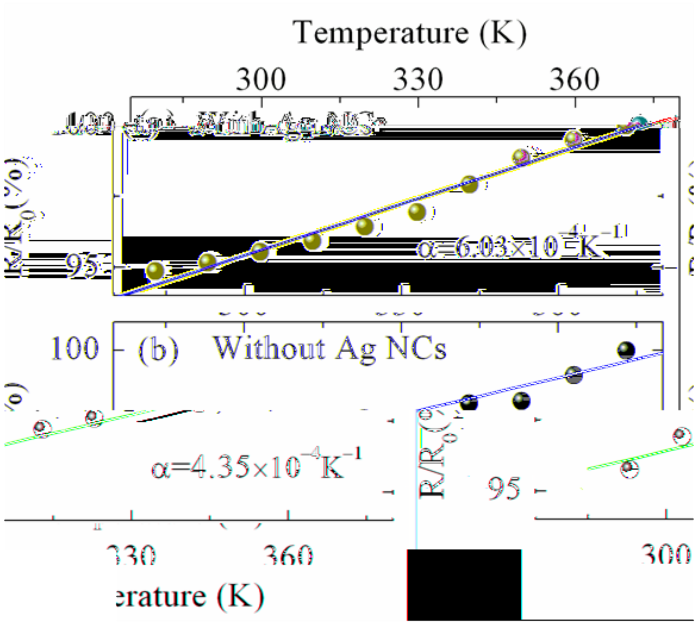


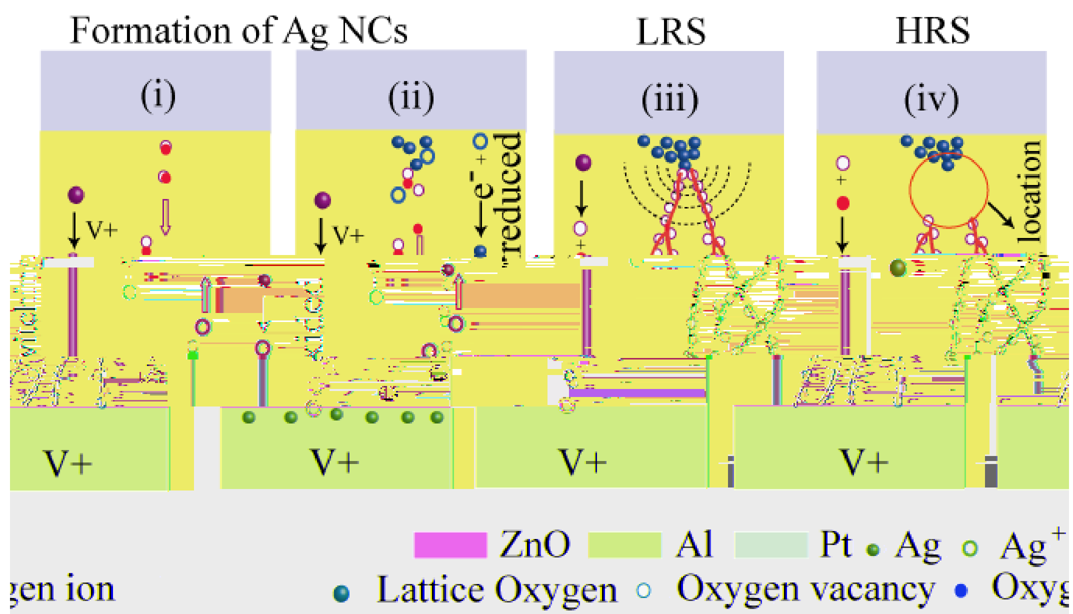
Nanoscale 5, 4490 (2013)

研究工作—高速ZnO RRAM器件

电化学活移　　强局域电场

Ag 纳米晶 → 尖端电极 → 可控性导电细丝 { 结构简单 / 转变位置局域化





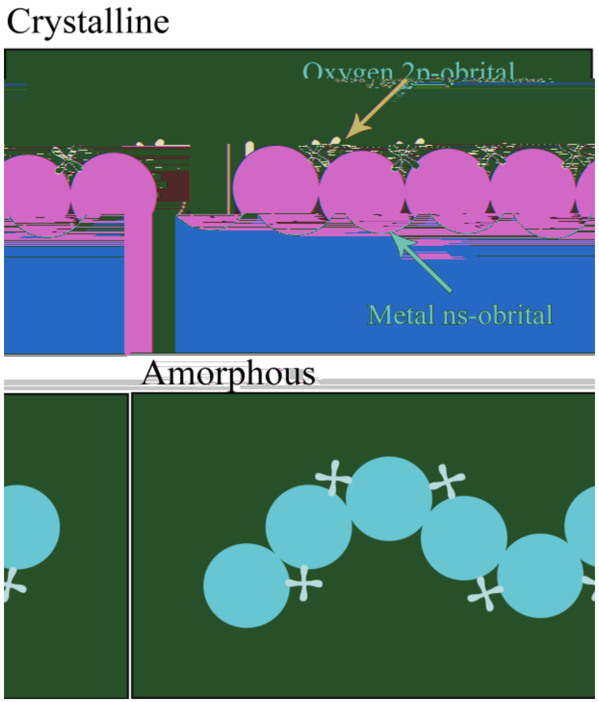
氧空位缺陷 ⟷ 低阻态(导电细丝)

Nanoscale 5, 4490 (2013)

研究工作——透明柔性ZnO基 RRAM器件

ZnO

In, Ga



In 5s

ZnO:In,Ga

RRAM

研究工作—透明柔性ZnO基 RRAM器件

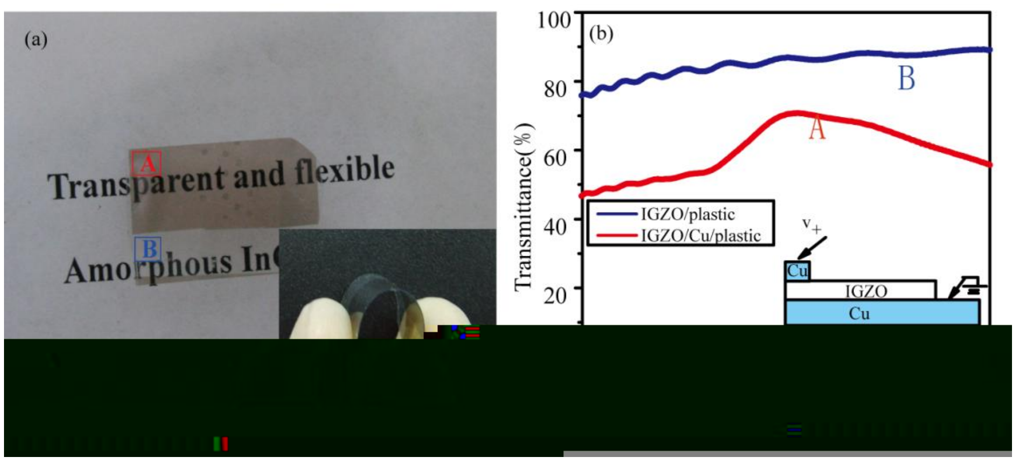
FT

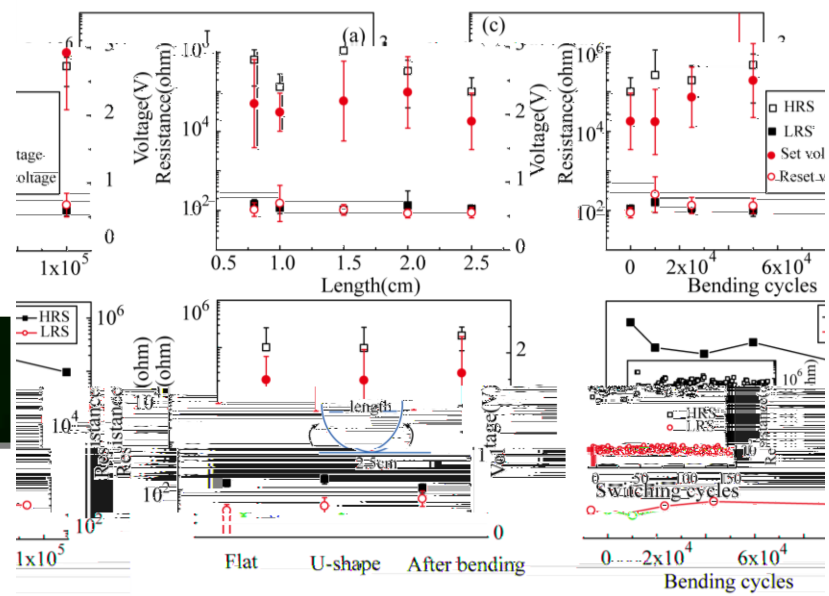
InGaZnO

RRAM

FTRRAM?

10^5





IEEE Electron Device Letters 32, 1442 (2011)

研究工作——ZnO基[illegible]神经突触仿[illegible]

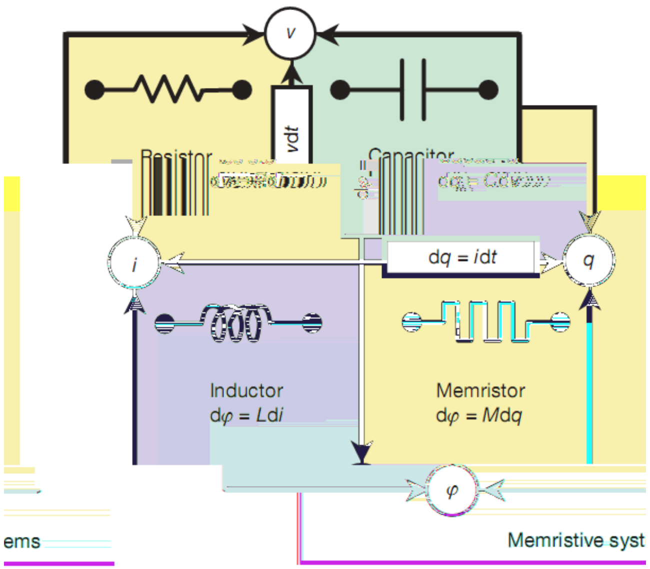
: Memristor =Memory+Resistor

PC

---- ----

1971

2008 HP The Missing Memristor found



高度相似

忆阻器：电阻阻值随流过的电荷量发生改变，并能够记住阻值的变化。

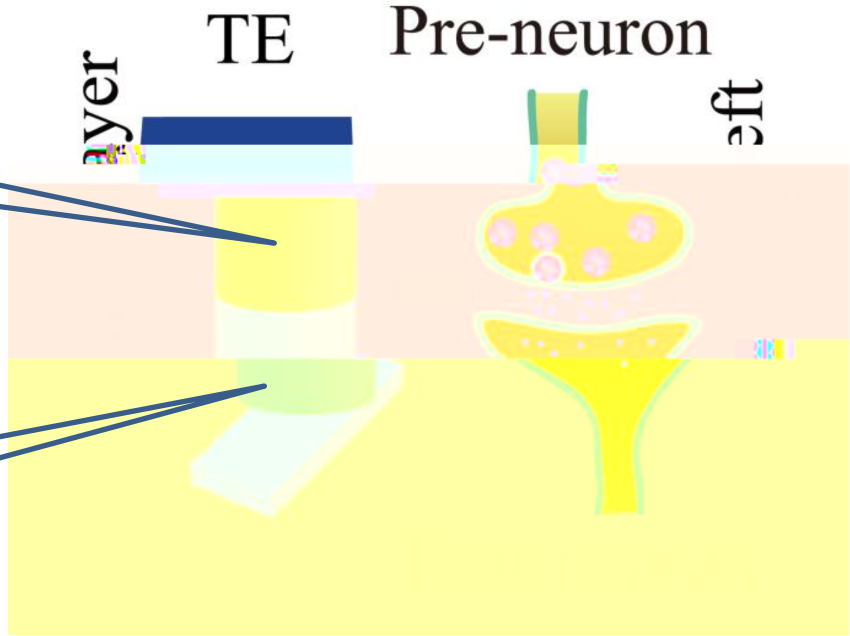
神经突触：连接状态随流经的离子而发生变化。

研究工作—ZnO

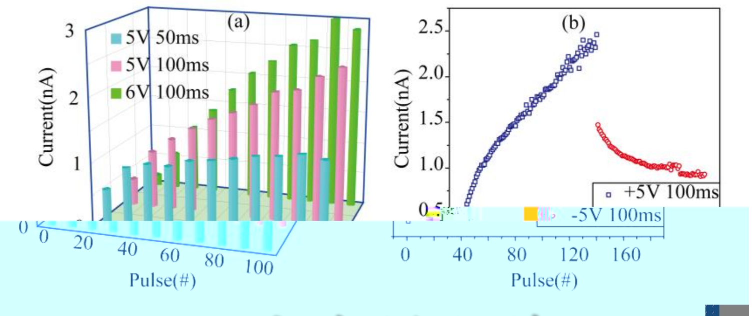
器件结构

O-rich IGZO: High resistance

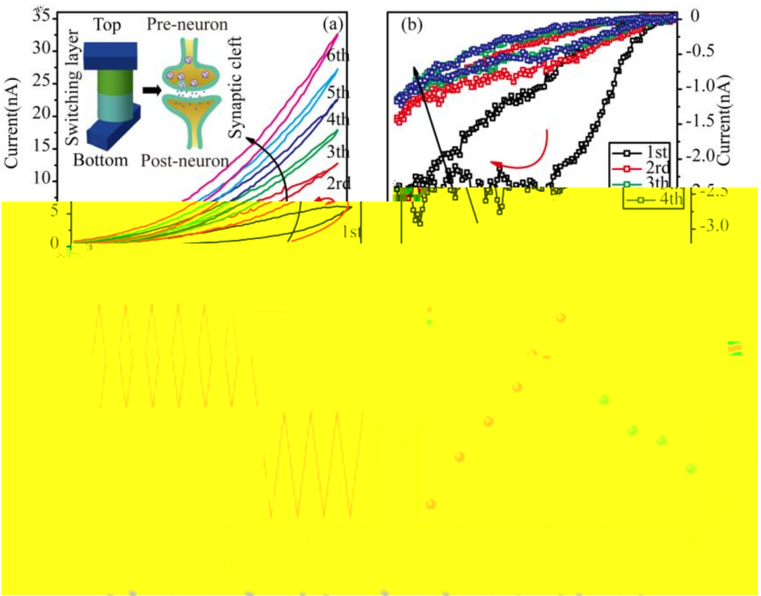
O-poor IGZO: Low resistance



研究工作——ZnO基忆阻器神经突触仿生



脉冲刺激特性



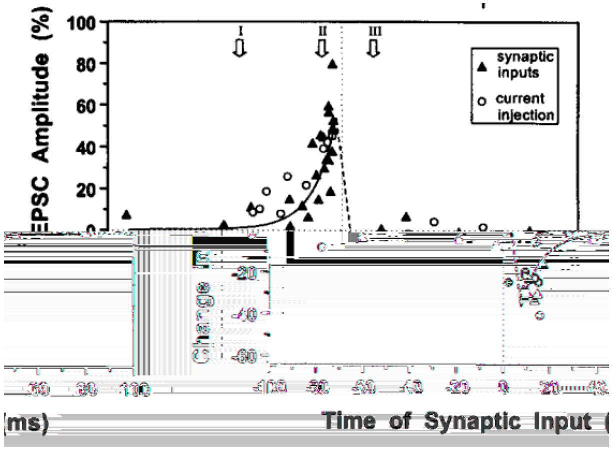
神经突触非线性传输

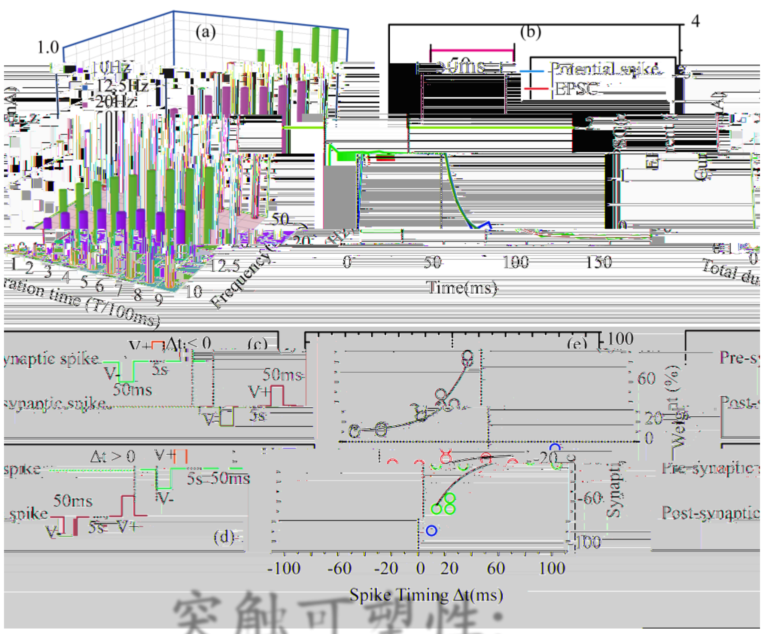
[Adv. Funct. Mater. 22, 2759 (2012)]()

研究工作—ZnO[illegible]神经突触仿[illegible]

STDP

生物突触





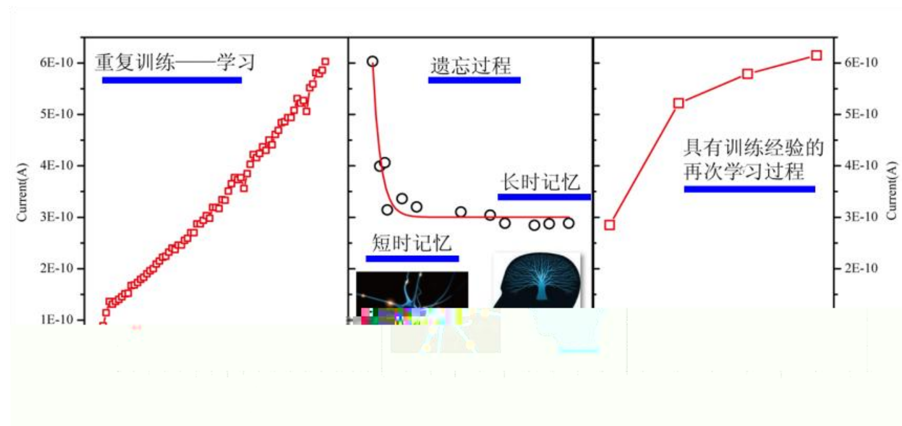
突触可塑性：

频率特性及STDP功能

Adv. Funct. Mater. 22, 2759 (2012)

研究工作——ZnO

STDP



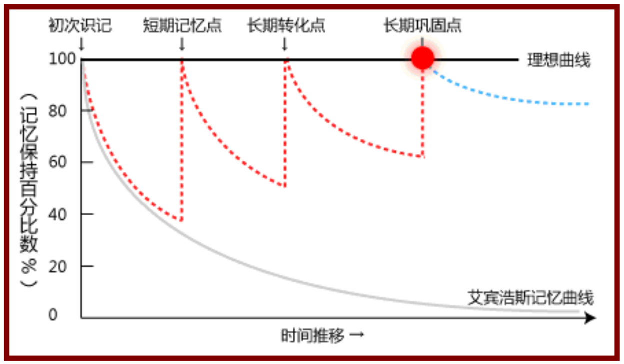
长短时记忆

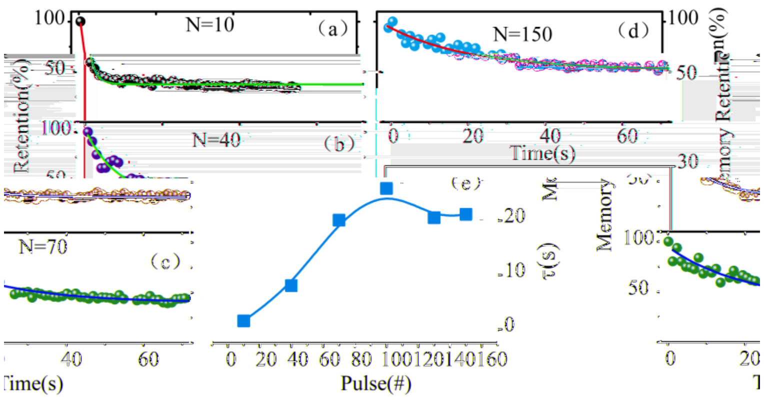
及经验式学习行为

[*Adv. Funct. Mater. 22, 2759 (2012)*]()

研究工作—ZnO基[illegible]神经突触仿[illegible]

STDP





重复训练：

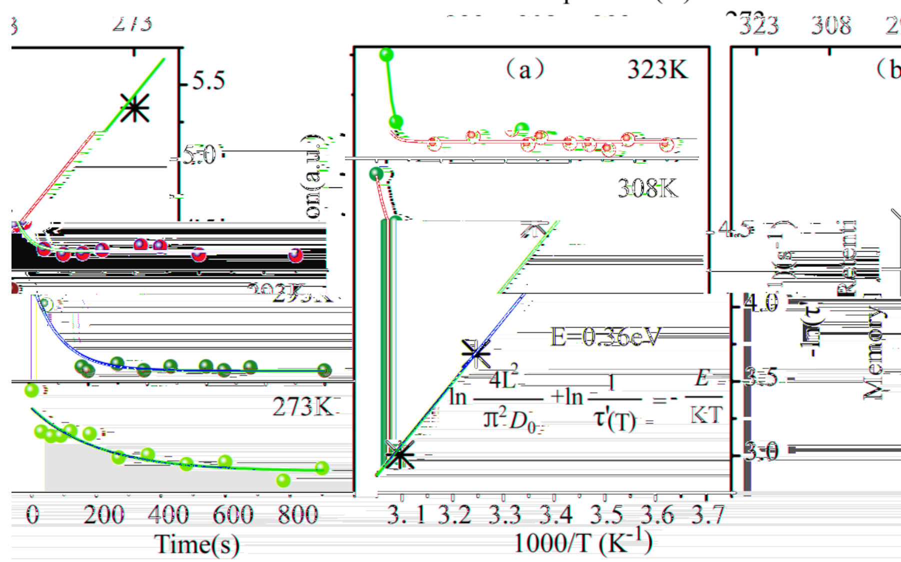
短时记忆向长时记忆的转化

Adv. Funct. Mater. 22, 2759 (2012)

研究工作——ZnO

STDP

短时记忆变温测试



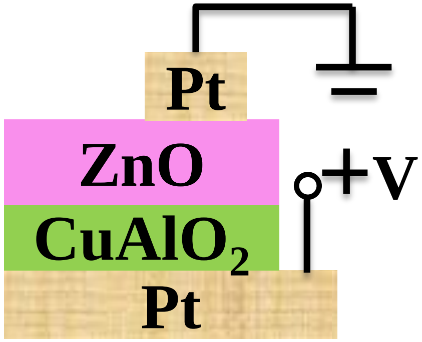
E=0.36eV
D=2.12 × 10^{-14} cm^{2}s^{-1}

E=0.4eV
D=5 × 10^{-14} cm^{2}s^{-1}

Adv. Funct. Mater. 22, 2759 (2012)

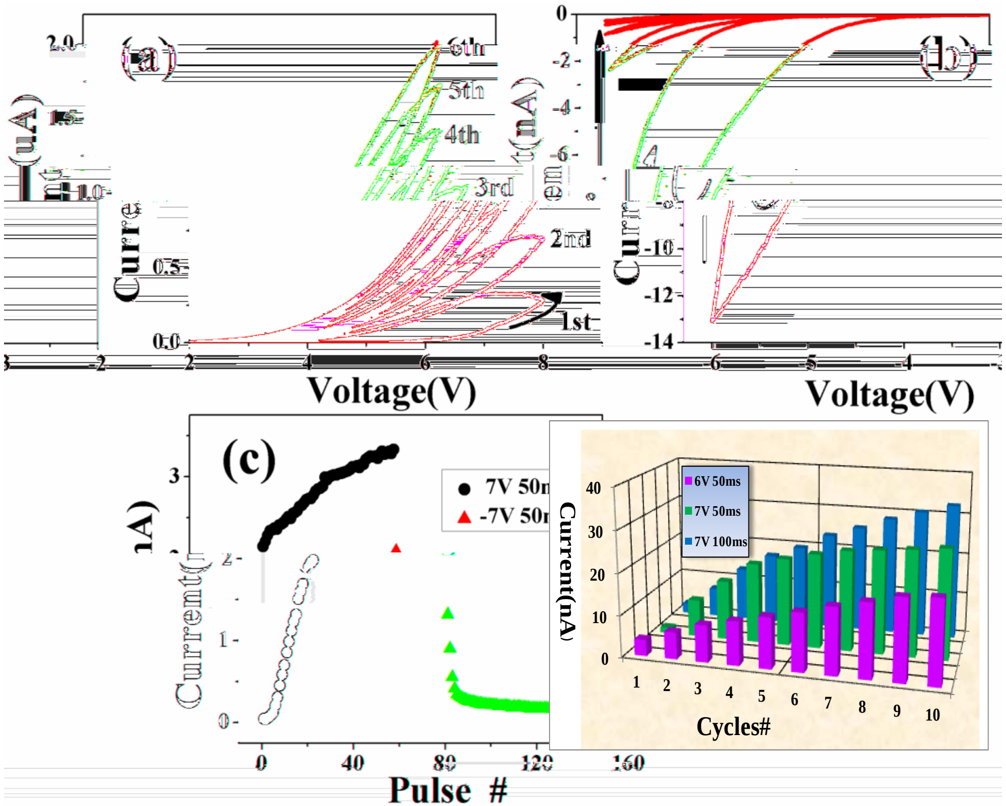
验证氧离子迁移/扩散机制

研究工作——p-n结器件的基本忆阻特性

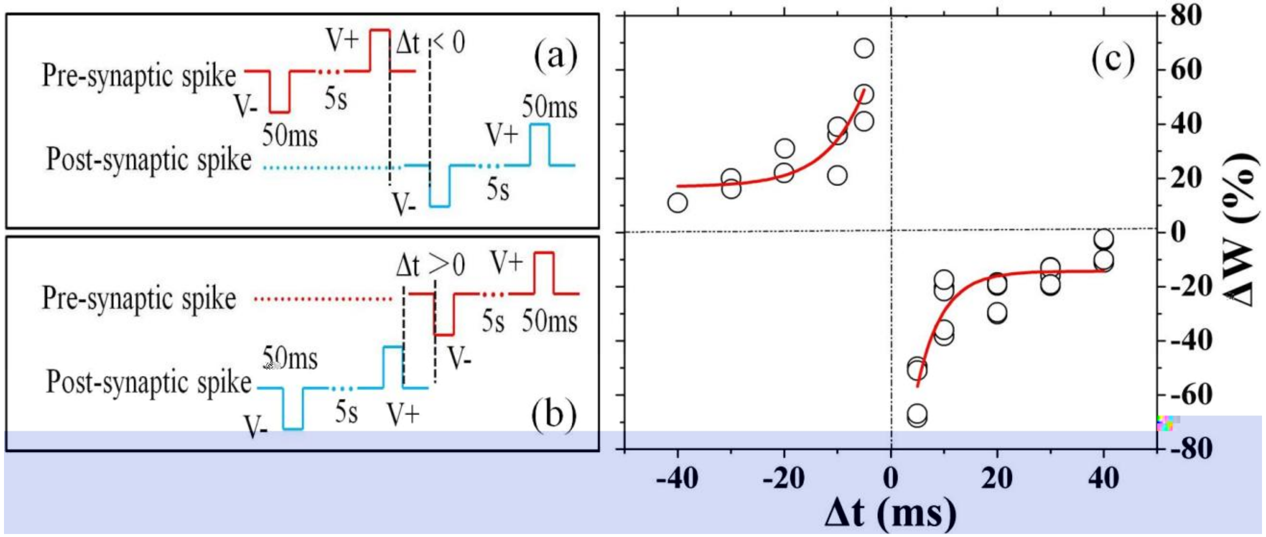


制备器件

- 择：
- 择：惰性　　、减小势垒

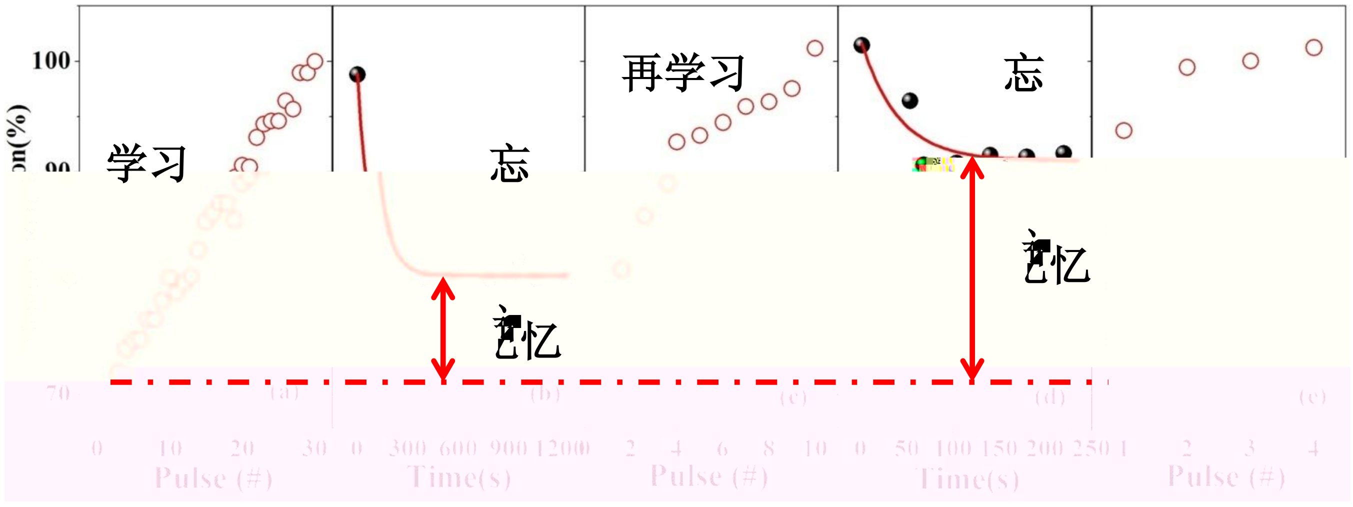


研究工作—p-n结器件的基本忆阻特性

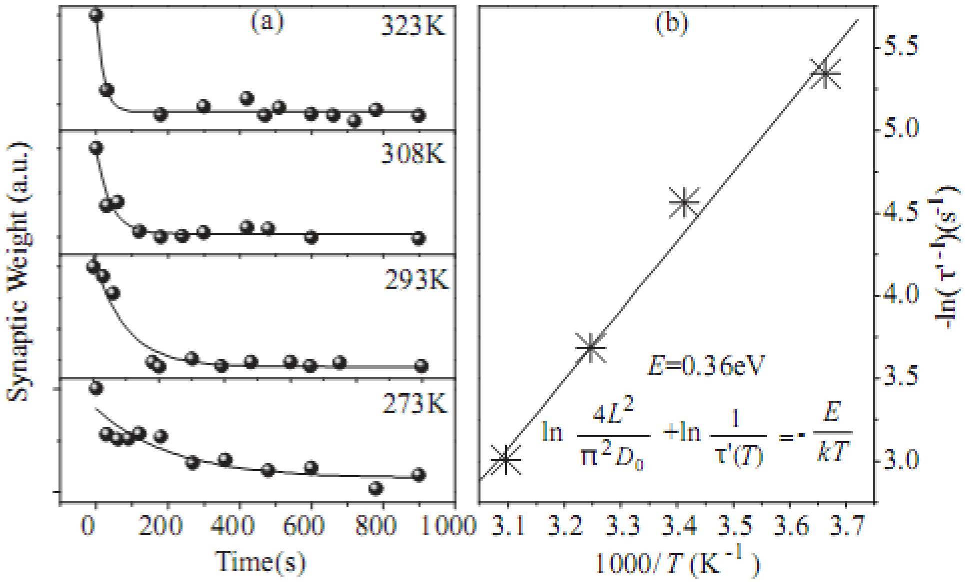


指　　　据拟合
体　了
STDP　性

忆　器可以很好
合　　　学
习、　忘　　律



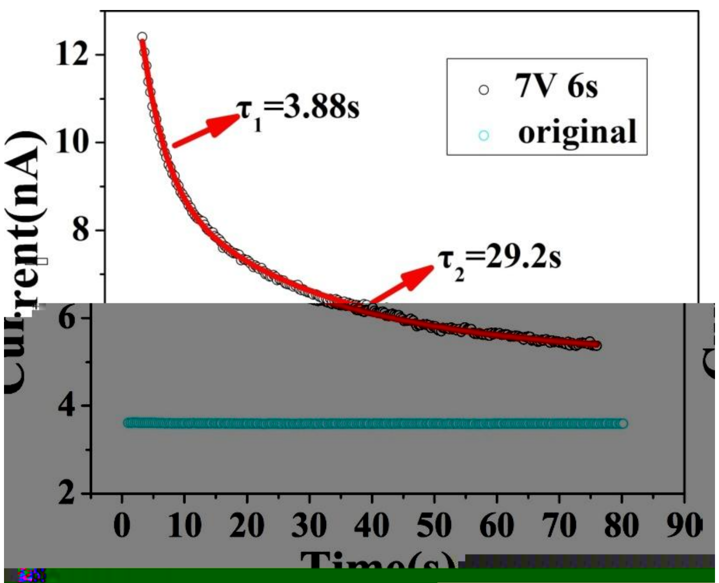
研究工作—p-n结器件的基本忆阻机制研究



IGZO双层忆　器

$I(t) = I_0 + A_1e^{(-}$

20-40s　弛　　　　可　　于
度差引　　　　　子回扩　。

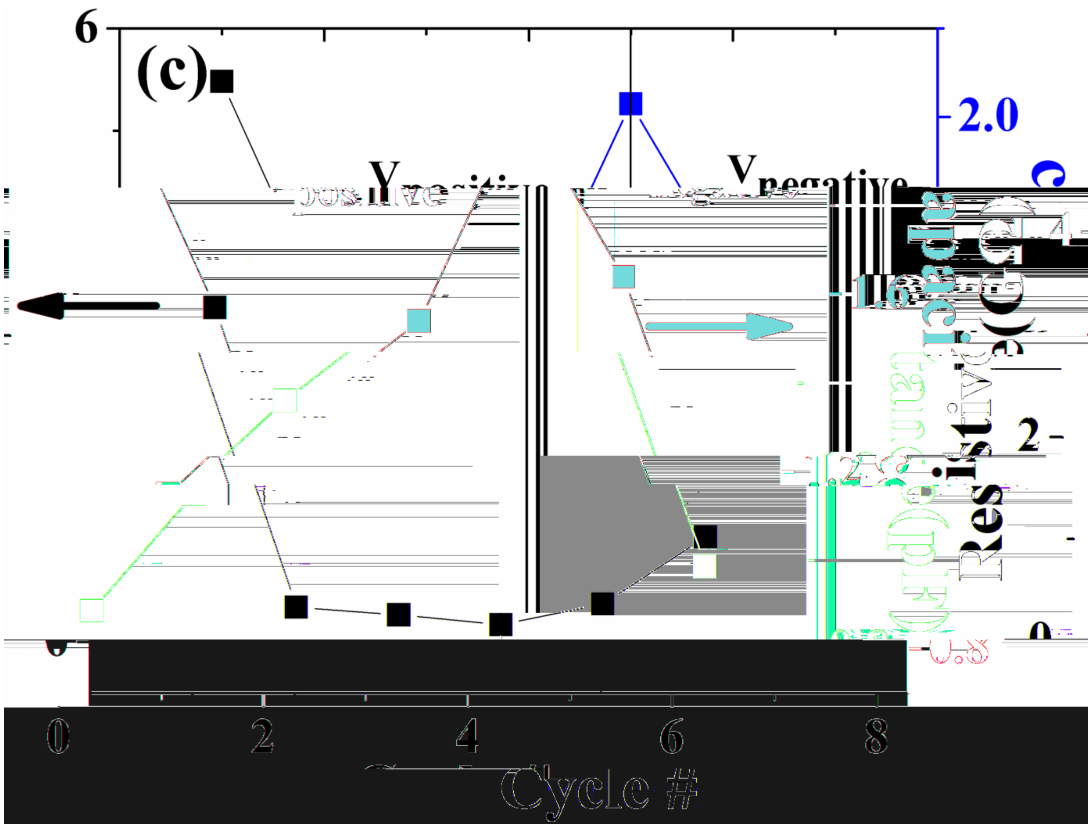


p-n　忆　器

$I(t) = I_0 + A_1e^{(-}\quad + A_2e^{(-}$

慢　弛　　　可　　　于　　　度差
快　弛　　　可　　　于内建　场

p-n　忆　器会　不同　　制



p-n 势垒 容

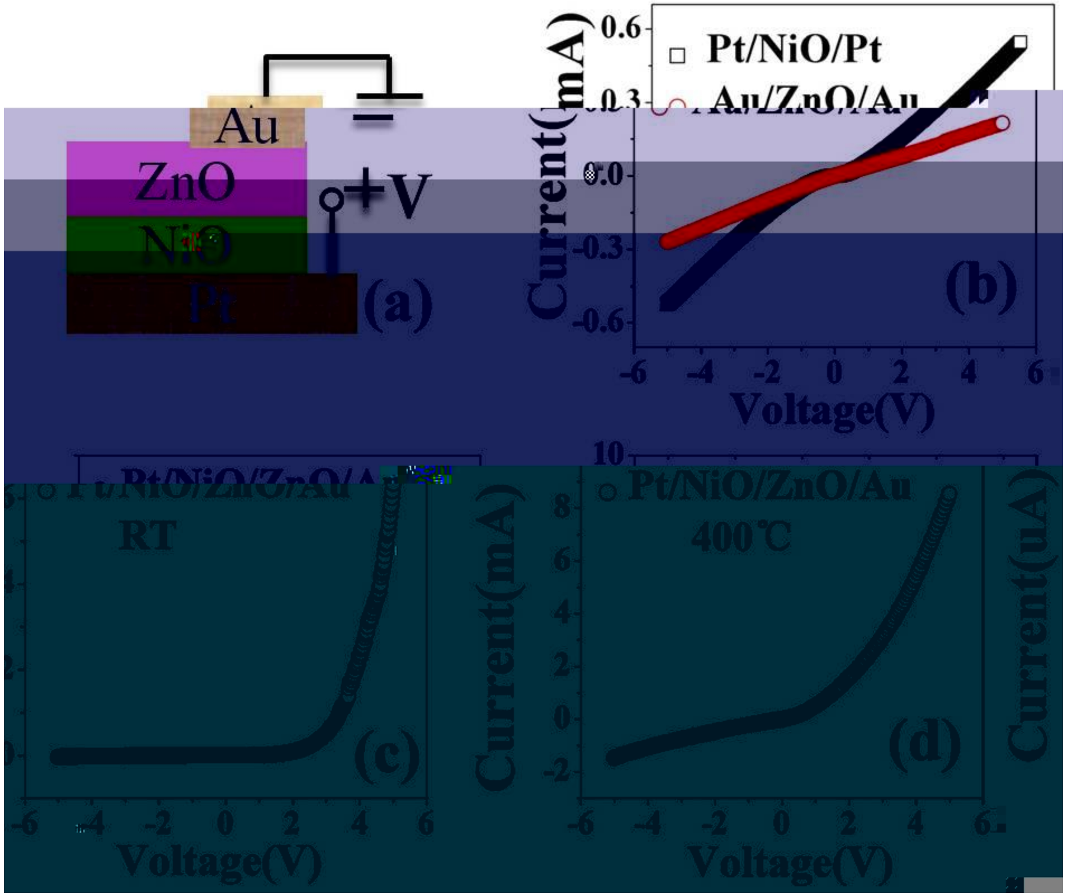
$C_T=A\ \ _r\ \ _0/X_D$

因 ： 偏压下，势垒区变 ， 减小，
反偏压下，势垒区变宽， 增加。

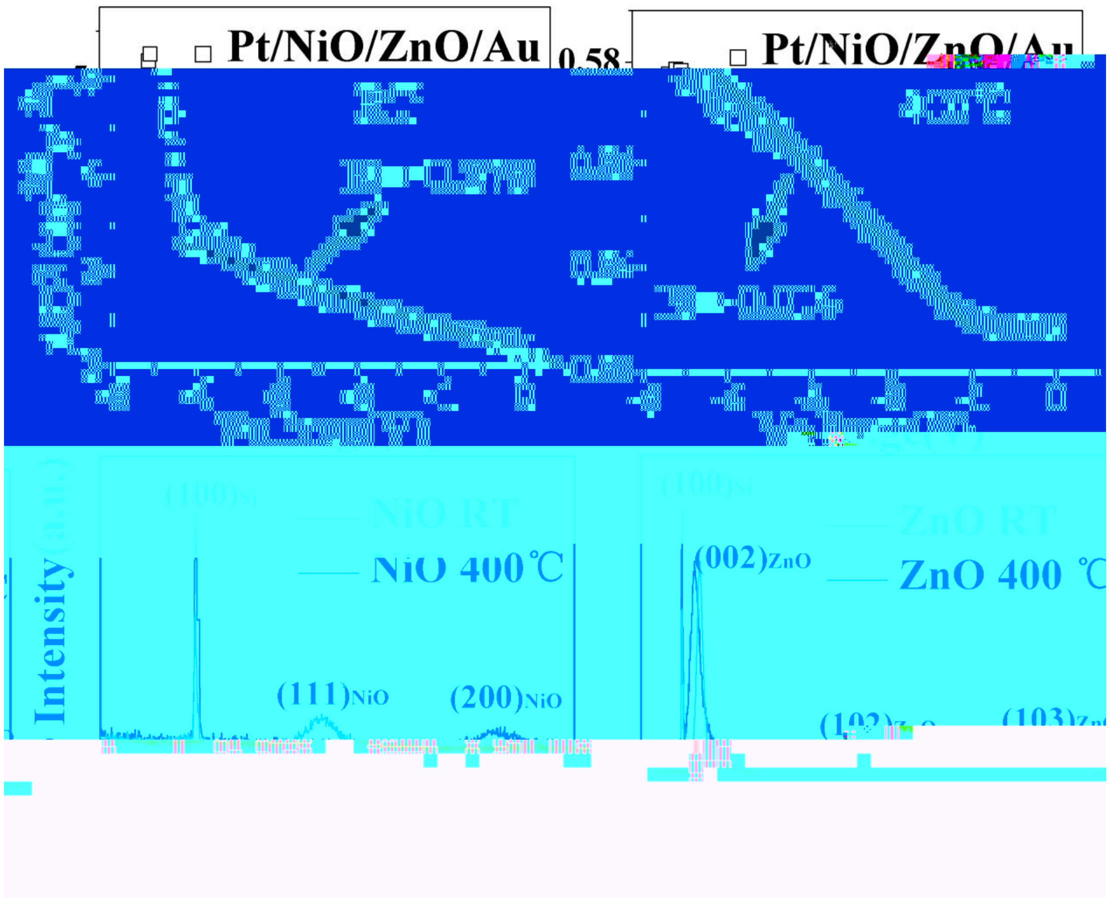
p-n

$$X_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 (N_A + N_D)(V_D - V)}{q N_A N_D}}$$

p-NiO/n-ZnO



400 度 p-n
器件容 开启，
室 ZnO/NiO
在 -5V 到 5V
围内并
开启，我们
为 只 对势垒
宽度 所导
增加。



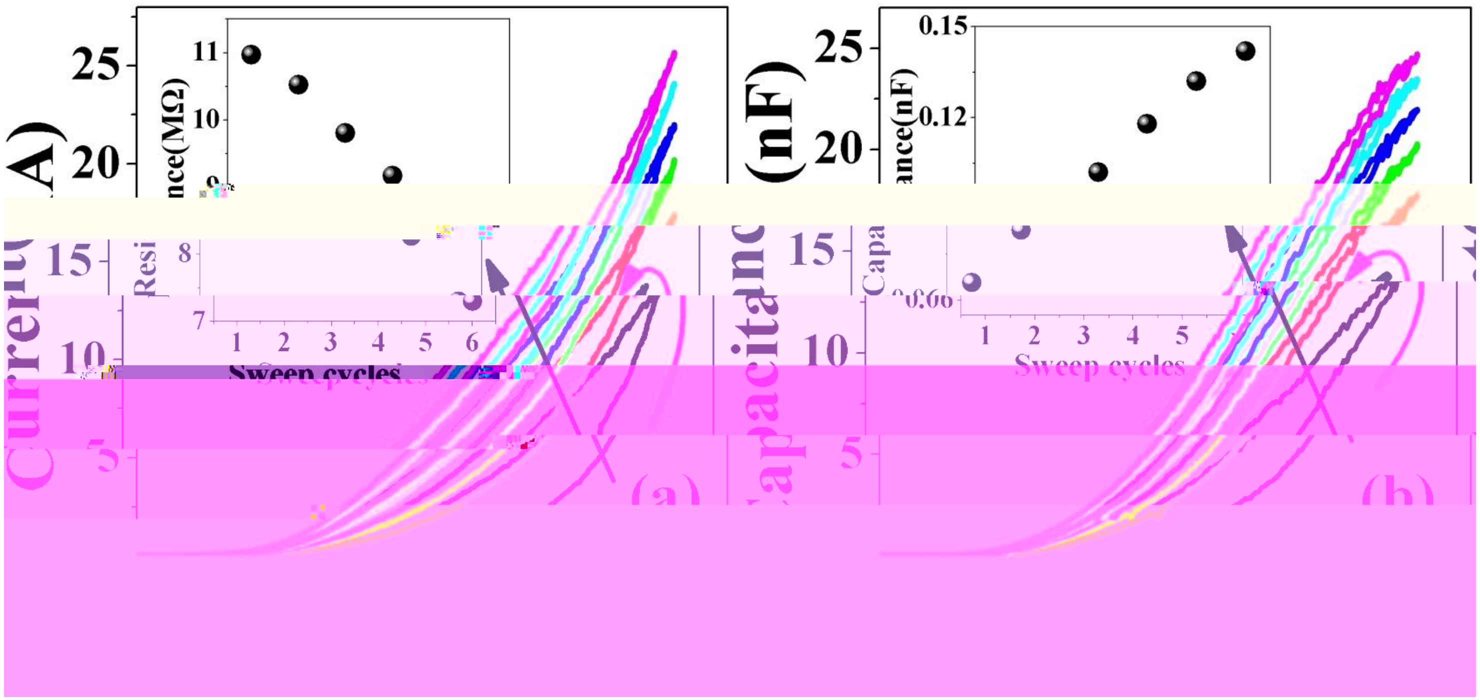
$$\frac{dC^{-2}}{d\phi}=-\frac{2}{q\varepsilon_0\varepsilon_r N_D A^2}$$

原因： 于室

， 性 对差，
又 外延关
， 子在

中 富
一 侧 向
一侧扩 ，
导 两 度 低。

400度 六 (002)峰与400度 NiO (111)峰 外延关 。

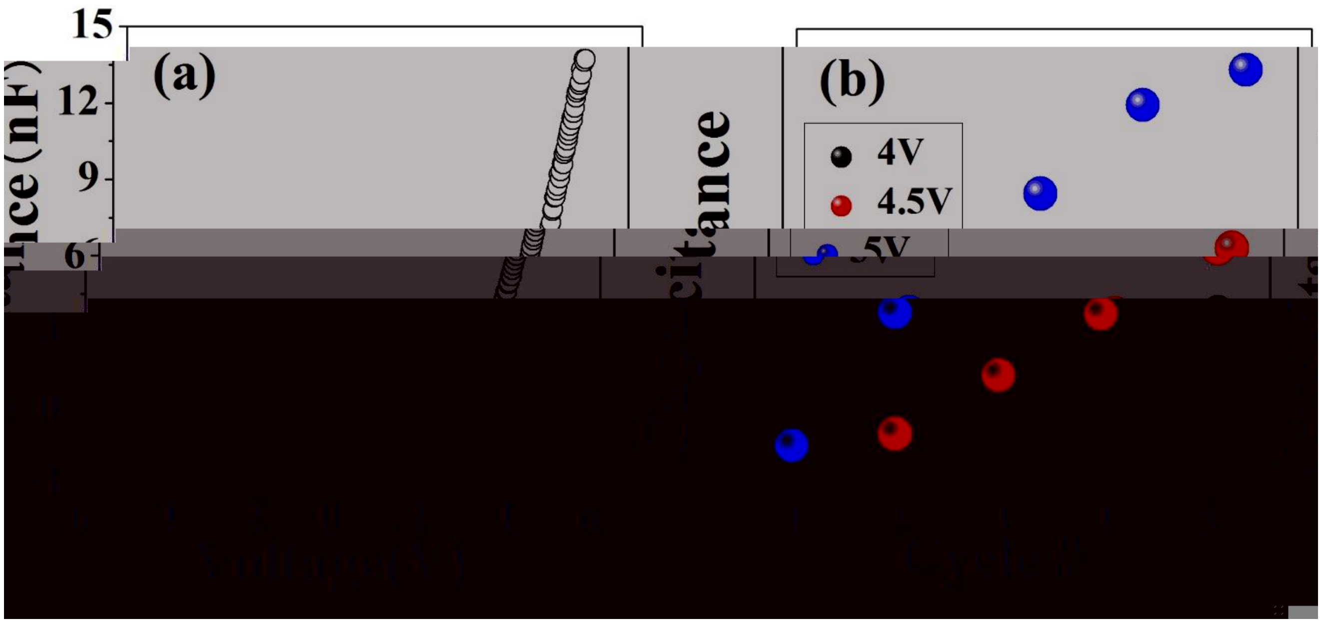


室 器件展 了忆 为，同 实 了

对 容 忆， 度下 器件 忆 为。

使 ，或 低 ， 利于

子在势垒区 ， 加利于实 忆 为。



为 忆容器提供一 思

总结

ZnO LED/LD

材料—— ZnO/MgZnO MgZnO/MgO /

器件—— PIN MIS p-GaN/i-ZnO/n-ZnO:Al Au/MgO(SiO_2)/ZnO

性能改善— &LSP

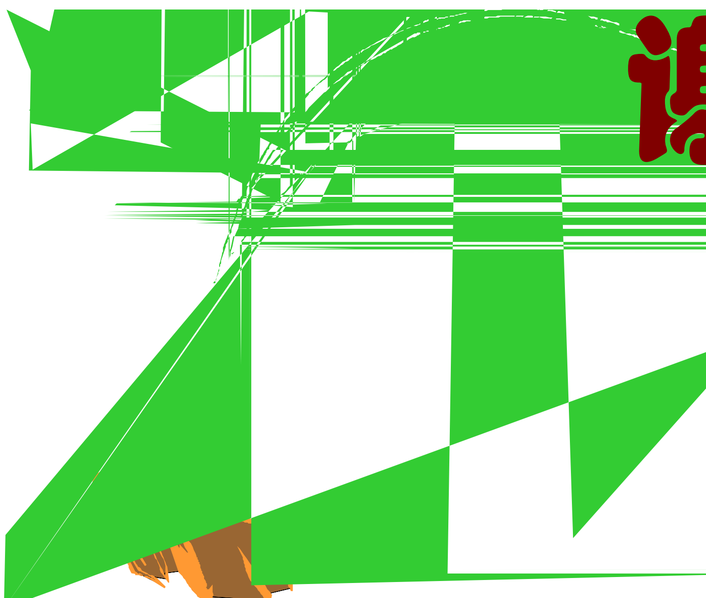
ZnO

材料改性— „

结构改进— „

原理探索— pn „

感谢国家**863**、**973**计划，国家基金委重点基金等项目的大力支持！感谢研究组老师、研究生的努力工作！



谢谢各位！