

宽禁带半导体紫外光电探测器研究

陆海¹, 陈敦军¹, 张荣^{1,2}, 郑有焯¹

1. 南京大学电子科学与工程学院, 2. 山东大学;



MOCVD
2014

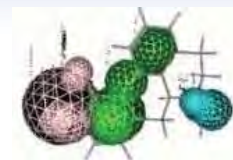
汇报提纲

- 技术应用背景
- 南京大学的部分研究成果
 1. GaN基可见光盲紫外探测器
 2. AlGaN基日盲深紫外探测器
 3. SiC紫外单光子探测器
- 总结与展望

紫外光探测器的重要应用领域

深紫外光探测器是国防预警与跟踪、环境监测、电力工业、紫外固化以及生命科学等领域所急需的关键部件。

生物检测



饮用水紫外消毒

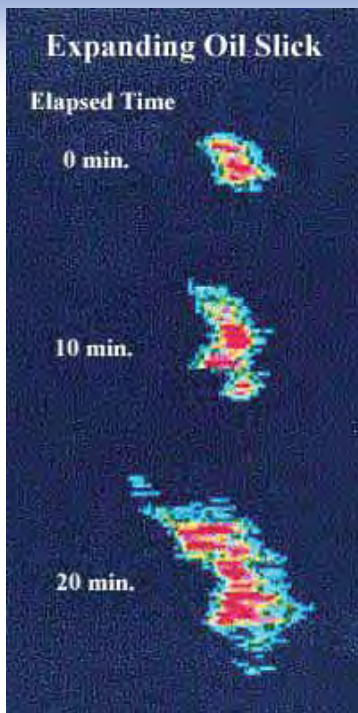


电晕检测

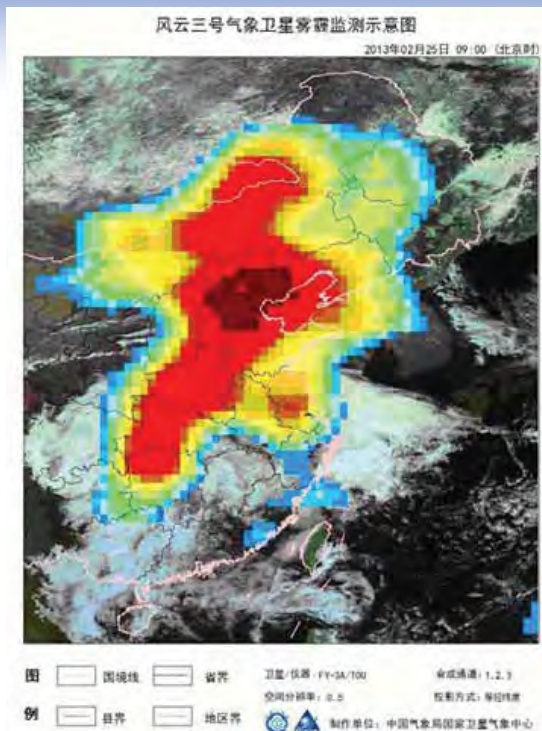
区域环境监测



国防应用

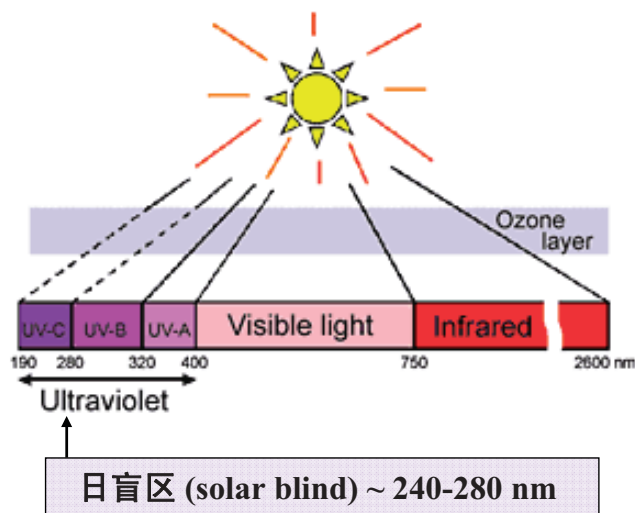


飞机检测海面反射的紫外线辐射，判断燃油泄漏与扩散范围。



由于雾霾对紫外线具有强烈的吸收作用，利用卫星遥感实现对雾霾的监测。

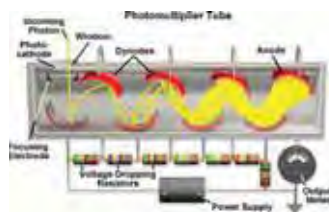
紫外探测在国防预警领域的重要应用意义



能够探测弱光的日盲紫外探测器及阵列不受太阳背景辐射噪音的干扰，在天基、空载、及舰载预警系统；红外/紫外双色制导等国防领域具有重要应用，一直是世界各主要国家之间研究和竞争的焦点。

常见的紫外探测器件

真空紫外探测器件 — 光电倍增管 (PMT)及ICCD等: 综合性能优, 技术成熟, 但体重大、量子效率低、寿命短、且需滤光和高压操作。

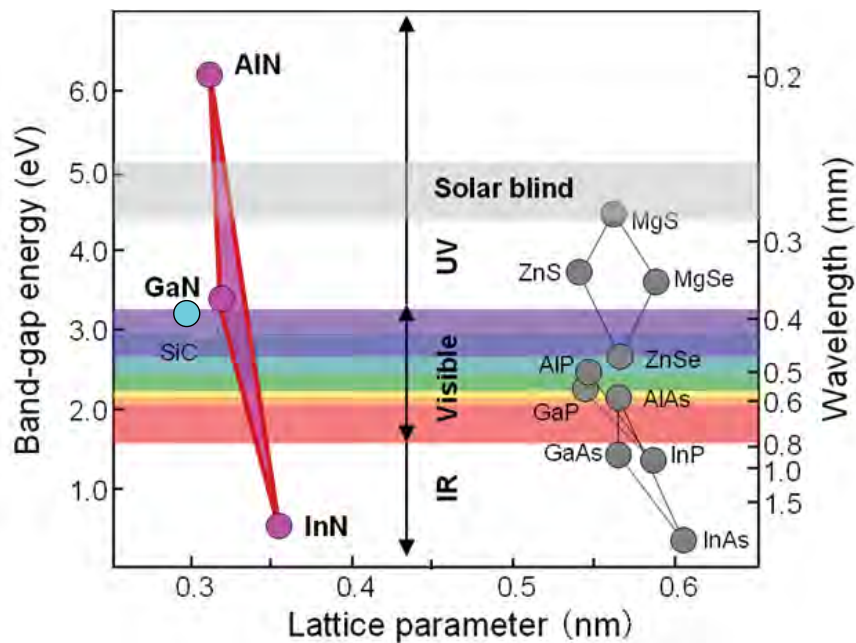


固态紫外探测器件 — 光导型、PIN、MSM、Schottky、APD型等半导体紫外探测器: 体重小、功耗低、量子效率高、便于集成。

- 基于Si、GaAs、GaP等常规半导体技术相对成熟, 需加装昂贵的滤波片
- 基于GaN、SiC、ZnO等宽禁带半导体耐高温, 化学稳定性优, 漏电流低



基于新型宽禁带半导体材料（如: GaN和SiC）的紫外光电探测器具有显著的潜在应用优势，是世界各主要国家研发的重点。



AlGaN可直接实现日盲，SiC实现可见光盲。

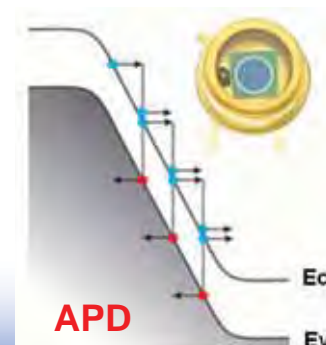
半导体紫外探测器的基本类型

1. 无增益的半导体紫外探测器：紫外辐射剂量的测定

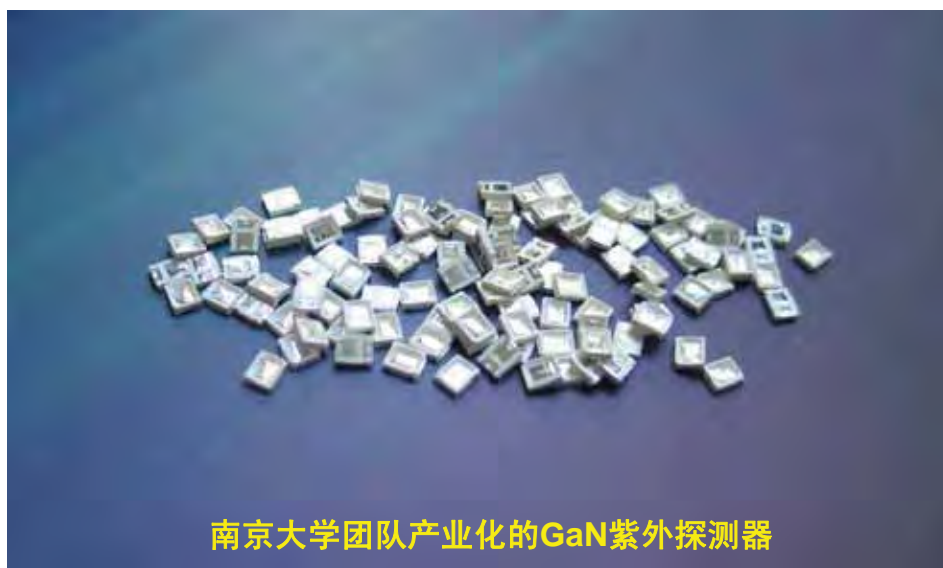
- ✦ PIN结构紫外探测器；
- ✦ 基于肖特基接触的紫外探测器，包括MSM紫外探测器等：可存在一定寄生的光电导增益，影响器件性能；

2. 有增益的半导体紫外探测器：微弱紫外光的探测

- ✦ Photoconductor和phototransistor：
增益有限，速度慢，高端应用受到限制；
- ✦ 雪崩光电探测器（APD）：**甚至可实现单光子探测，但制作难度很大。**




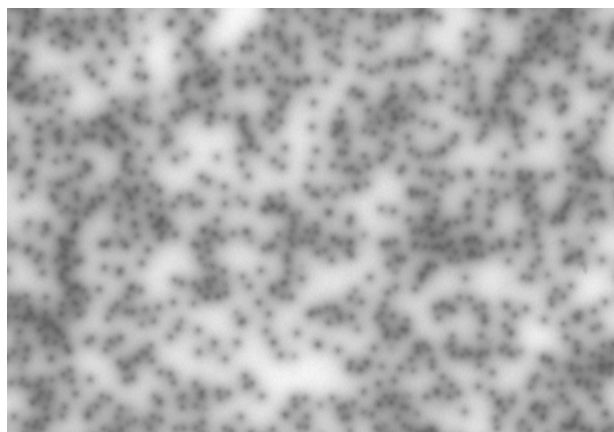
GaN可见光盲紫外探测器



高密度缺陷严重影响GaN基紫外探测器性能

由于大的晶格失配与热膨胀失配，异质外延GaN材料普遍具有很高的缺陷密度 (位错密度 10^8 - 10^{10} cm^{-2})。这些缺陷是非辐射复合中心、漏电通道、陷阱中心，会大幅增加探测器暗电流，弱化其噪音特性和可靠性。

	$[11-20]_{\text{III-N}} // [10-10]_{\text{Sap}}$ 30° Rotation
Atomic arrangement	
GaN $a=3.189 \text{ \AA}$	+16.1%

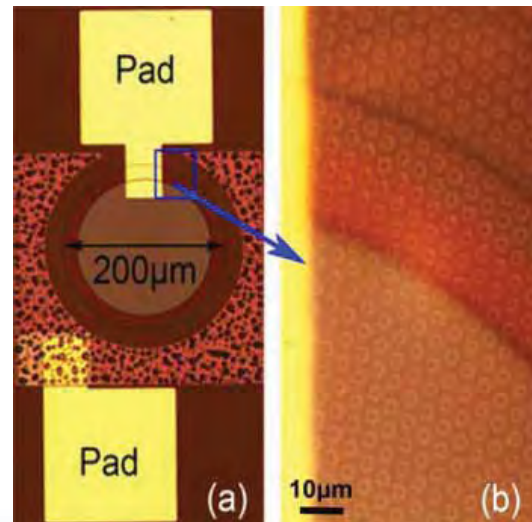
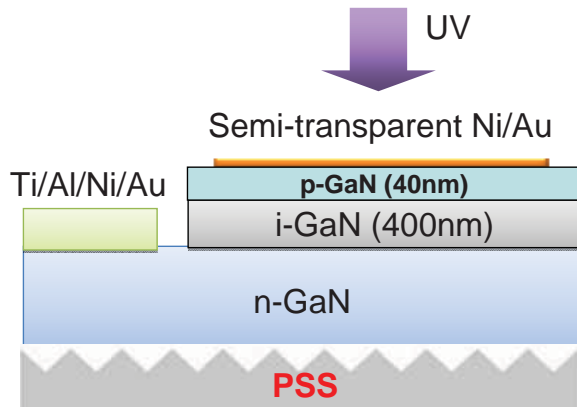


GaN与蓝宝石衬底的大晶格失配

生长在常规蓝宝石衬底上的GaN材料

制备在PSS蓝宝石衬底上的GaN紫外探测器

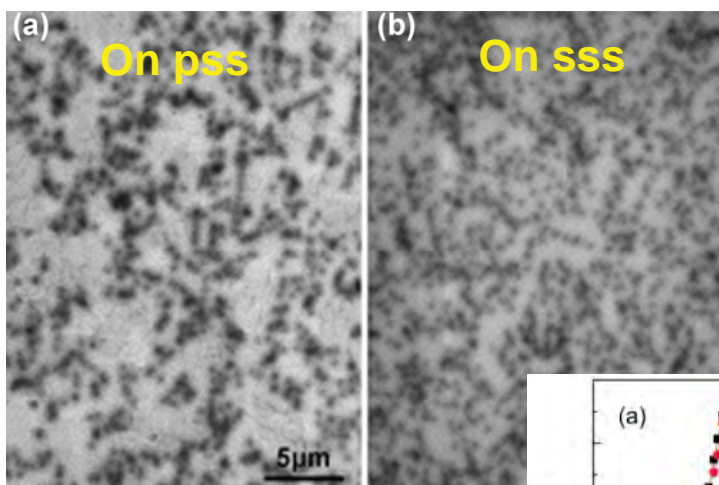
在PSS蓝宝石衬底上制备高亮度GaN基LED已经是一项成熟的产业化技术，这一技术不仅可以提高LED的出光效率，而且通过改善外延层晶体质量来提高LED内量子效率。



PSS: pattern sapphire substrate
SSS: standard sapphire substrate

IEEE Photonics Tech Lett 25, 652 (2013)

生长在PSS蓝宝石衬底上的低缺陷密度GaN



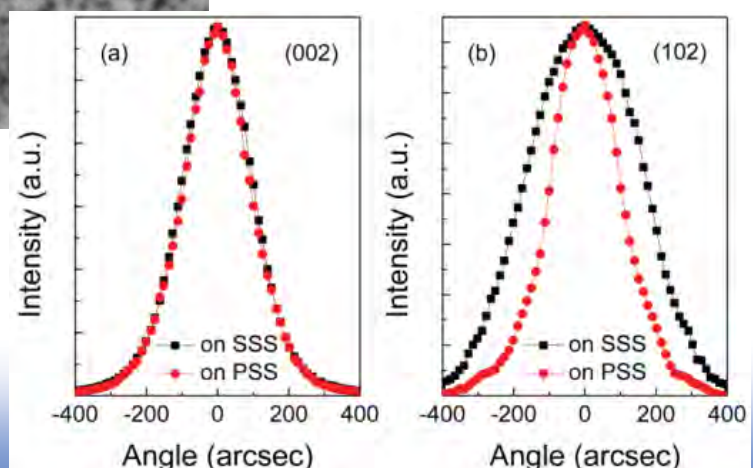
基于CL mapping:

DD: $\sim 6-8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ for PSS

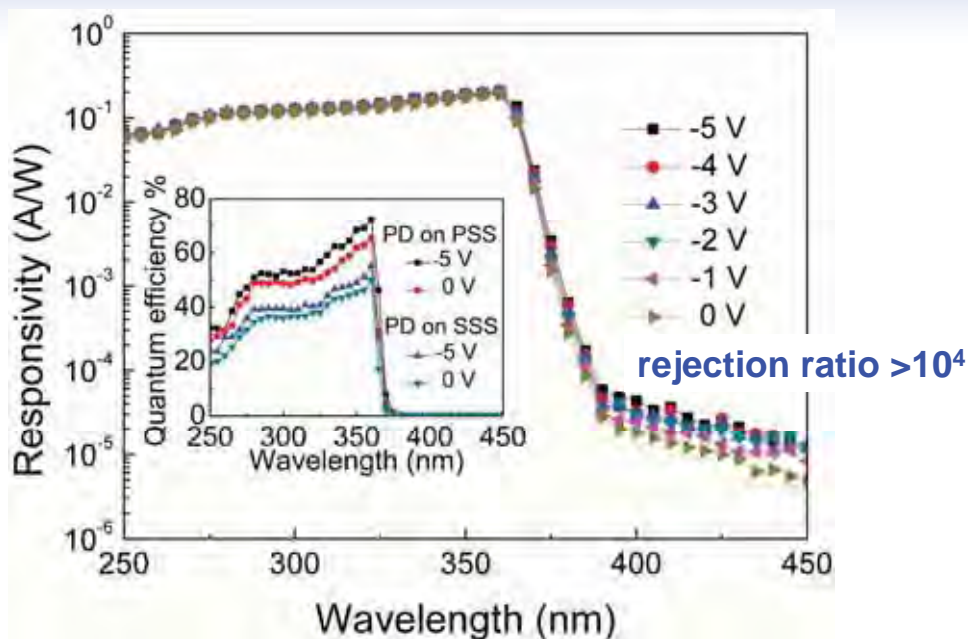
$\sim 1-2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ for SSS

	PSS	SSS
FWHM of (002)	212	226
FWHM of (102)	224	384

XRD测试表明：减少的位错主要为刃位错。



提升的光电响应特性



1. 制备在PSS衬底上的GaN PIN紫外探测器具有低漏电流 (~ 1 pA at -5 V, not shown) 和高响应度 (~ 0.19 A/W at 360 nm, 对应 $QE_{\max} \sim 65\%$);
2. 在250-365nm波长区域, PSS衬底上GaN紫外探测器相比制备在平面蓝宝石衬底上探测器在量子效率上平均高25%。

高灵敏度GaN基紫外探测器产业化

基于PSS和其他专有器件技术, 南京大学团队在国内率先实现了高灵敏度GaN紫外探测器件的产业化, 实现了多型号产品的批量供应。



微稼半导体公司



TO系列GaN紫外探测器

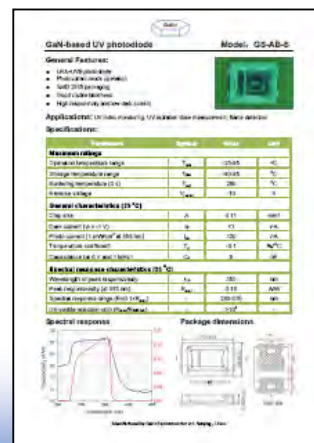
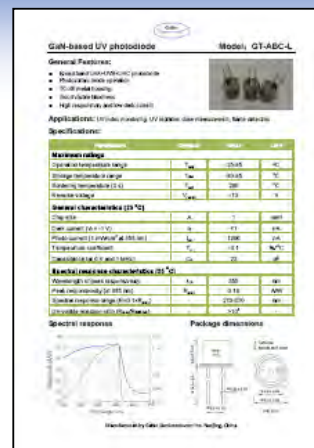


SMD系列GaN紫外探测器

与国外产品性能对比

参数	公司	国内其他	微纳 GaNo	韩国 Genicom	欧洲 Sglux
产品型号	-	-	UVA-TO-45	GUVA-T11GD	SG01L-18
使用材料	无	无	GaN	GaN	SiC
响应波段 (nm)	无	无	210-370	220-370	220-360
峰值响应度 (A/W)	无	无	0.18 (355nm)	0.18 (350nm)	0.13 (300nm)
暗电流 (nA, -5V 偏压下)	无	无	<0.1	<1	<0.01
结电容 (pF)	无	无	40	120	160
工作温度 (°C)	无	无	-30-130	-30-85	-55-170
综合成本	无	无	低	中	很高

索要免费试用样品, 请联系: ganosemi@126.com



为了进一步提高材料质量 → 体GaN衬底



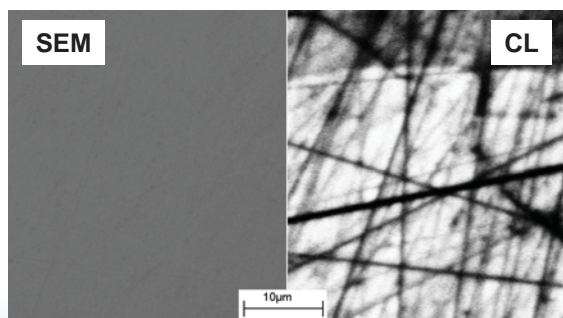
商用大尺寸GaN体材料衬底已经逐渐出现, 需要进一步解决的核心问题:

同质外延

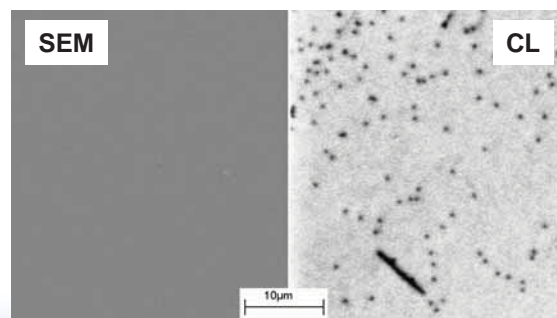
GaN表面原位微刻蚀方法

为了去除GaN衬底由于抛光技术不成熟导致的表面缺陷，发展了针对GaN体衬底的表面原位微刻蚀方法：通过将GaN衬底在 NH_3 和 H_2 混合气体中进行特定条件退火，通过可控的表面分解作用去除表面缺陷，之后可连续进行MOCVD同质外延生长。

处理前（大量划痕性缺陷）

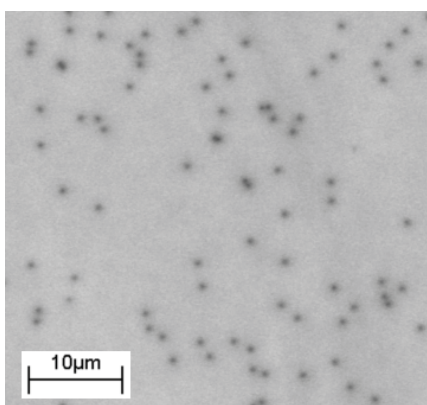


处理后（主要为位错缺陷）

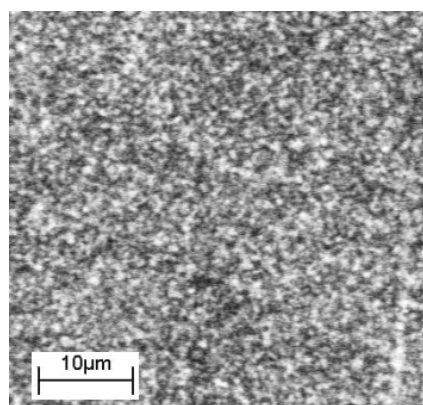


Solid-state Electronics 52, 817 (2008)

具有很高晶体质量GaN同质外延层的实现



我们的GaN同质外延层
位错密度 $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$



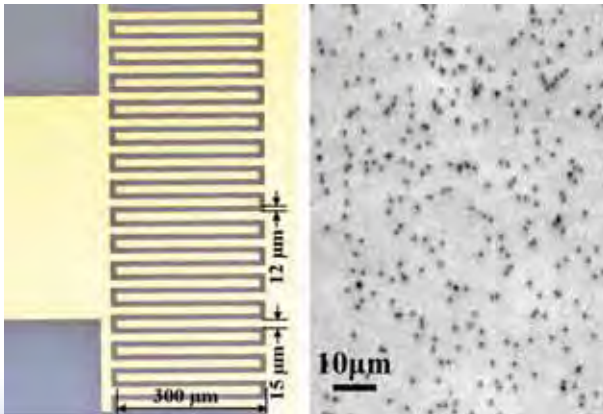
蓝宝石衬底上高品质GaN
位错密度 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$

在发展GaN原位微刻蚀技术的基础上，通过外延生长条件优化，获得了具有很高晶体质量的GaN同质外延层，并且可以实现大变化范围的可控掺杂。

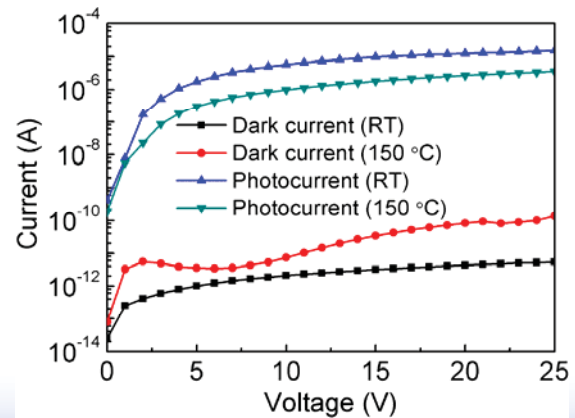
Appl. Phys. Lett. 91, 172113 (2007)

制备在GaN同质外延层上的MSM紫外探测器

- MSM光探测器相比于其他类型光探测器具有许多优势：低电容高速、不需P型掺杂、制作简单并与FET工艺兼容。
- 高晶体质量GaN外延层是实现低暗电流紫外探测器及雪崩光电探测器的保证。

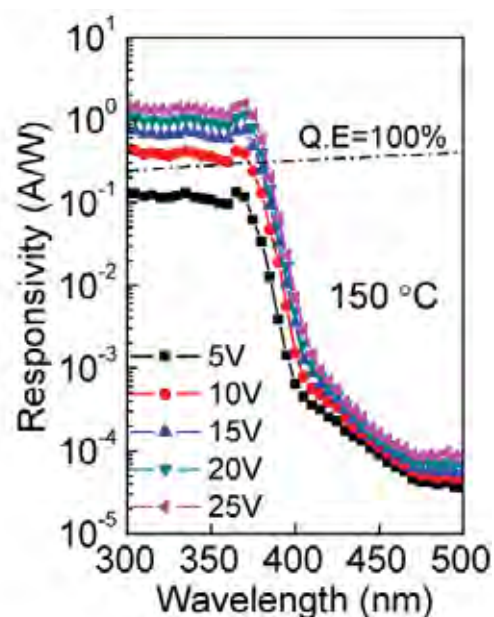
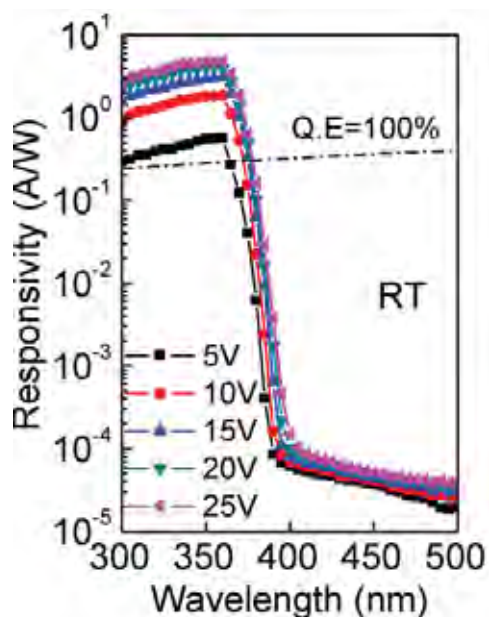


300um×1mm 大尺寸器件



20V偏压下暗电流仅在pA量级

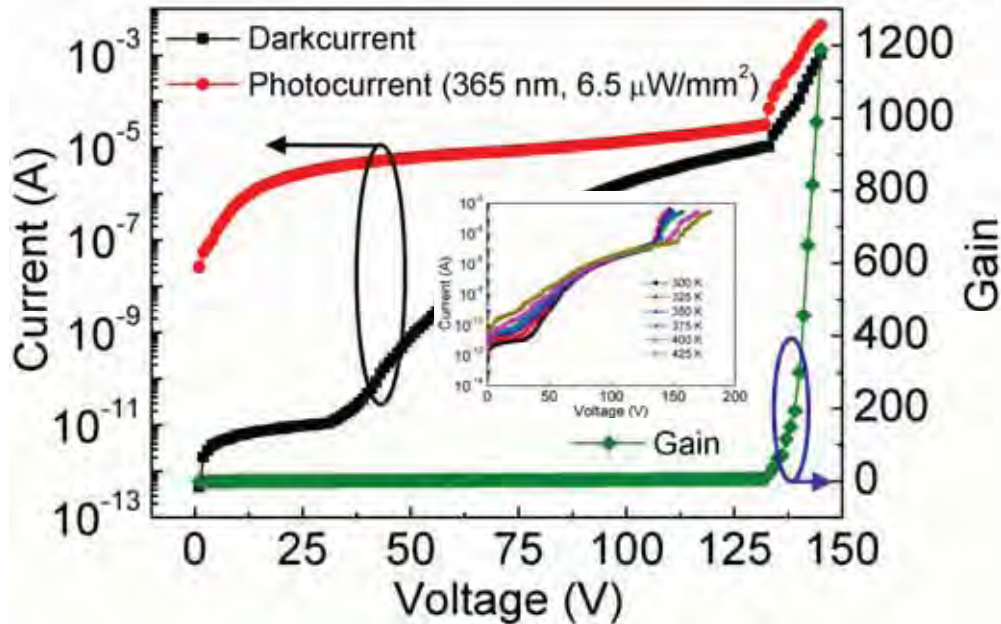
高抑制比: $> 10^5$ (RT); $> 10^4$ (150 °C)



该紫外探测器仍然显示出的光电导增益是由光生空穴被界面态捕获和镜像力导致的肖特基势垒降低造成的。

Solid-state Electronics 57, 39 (2011)

基于GaN体材料衬底的MSM UV-APD



- 增加偏置电压，电极边缘电场达到GaN临界击穿电场时，探测器发生雪崩击穿，线性区增益因子大于1100；为目前已报导的尺寸最大的GaN基APD (300um × 1mm)。

IEEE Electron Dev Lett 32, 1260 (2011)

semiconductor TODAY
COMPOUNDS & ADVANCED SILICON

OXFORD INSTRUMENTS Etch, Deposition & Growth

Search **semiconductor Today: the first choice for professionals w/FREE Registration**

Home | News Archive | Features | Directory | Recruitment | Events | About Us | Advertising | Contribute



News

5 August 2011

Metal nitride semiconductor avalanche for UV detection

Researchers in China have reported the first demonstration of a gallium nitride (GaN)-based planar metal-semiconductor-metal avalanche photodiode (APD) sensitive to ultraviolet light [F. Xie et al, IEEE Electron Device Letters, published online 14 July 2011]. The research group consisted of scientists from Nanjing National Laboratory of Microstructures, the Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Photonic and Electronic Materials, and Nanjing University.

The researchers used conductive free-standing bulk GaN substrates created via hydride vapor phase epitaxy (HVPE) to improve material quality. These substrates are much more expensive than the sapphire substrates used commercially as a base for nitride growth. However, as techniques develop it is to be hoped that free-standing GaN will drop in price. By using such substrates, the researchers were able to make devices with 400µm x 400µm effective device area, which is claimed to be the largest for GaN-based APDs so far reported.

Avalanche photodiodes work in a reverse-bias state, where a photon that is absorbed produces an electron-hole pair, the electron of which then accelerates in the high bias field and goes on to create further electrons by impact ionization. Gallium nitride has a wide bandgap of about 3.4eV that makes it sensitive to ultraviolet light with wavelengths greater than 365nm.

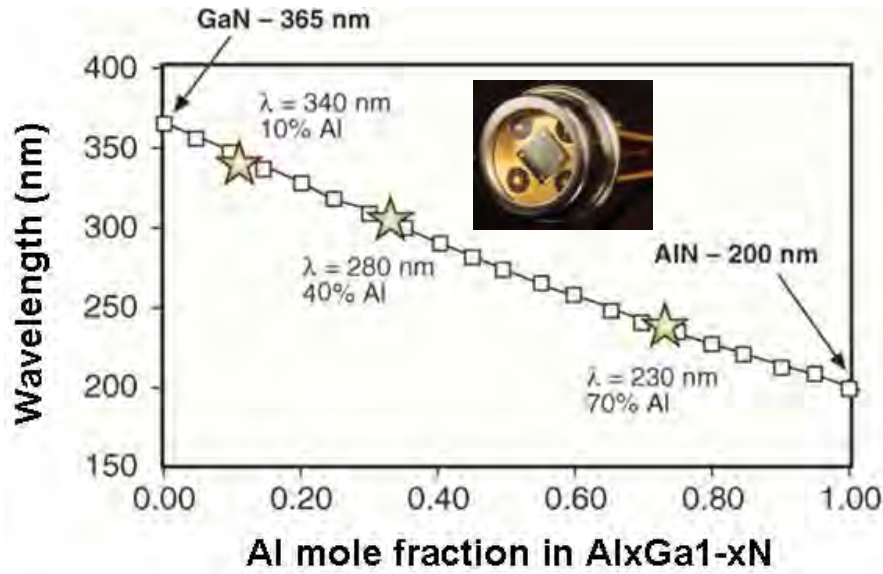
It is important in such devices that dark current and premature breakdown microplasma effects be reduced. As usual, these problems in nitrides are linked to material quality. The most commercial technique at present for producing nitride semiconductor devices is to grow the material on sapphire substrates. However, such growth results in many dislocations and other defects. The presence of defects restricts the area of devices that can be achieved, usually to less than 100µm in diameter.

The free-standing substrates used for the Chinese research were 320µm thick and had a room-temperature conductivity of ~0.01 Ω-cm. Metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) homoepitaxially added a 1µm heavily n-type GaN buffer layer, followed by a 3µm n-type GaN active layer.

The dislocation density in the GaN layer was measured via cathodoluminescence



AlGaN基日盲深紫外探测器



最大的技术挑战在于高Al组分AlGaN材料的外延生长！

高Al组分AlGaN材料在生长方面的挑战

AlN/GaN晶格失配2.4%

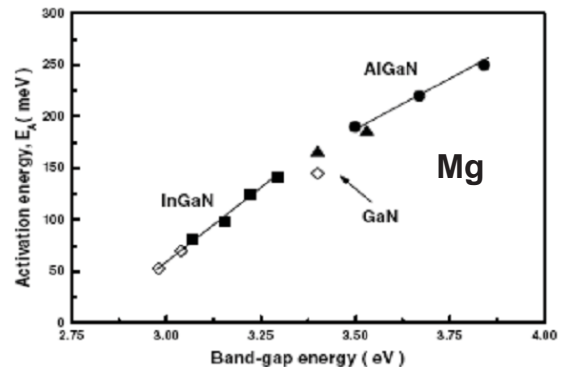
tensile



高应力，高缺陷



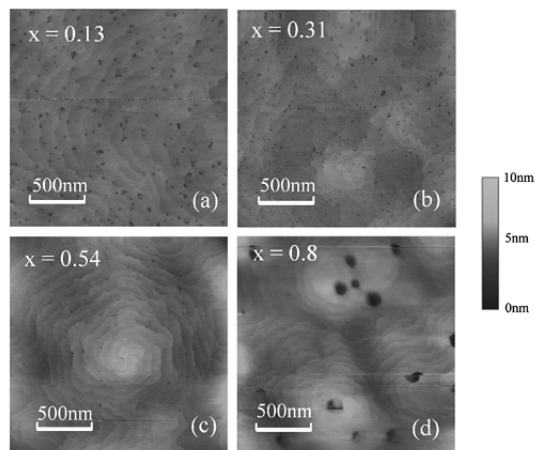
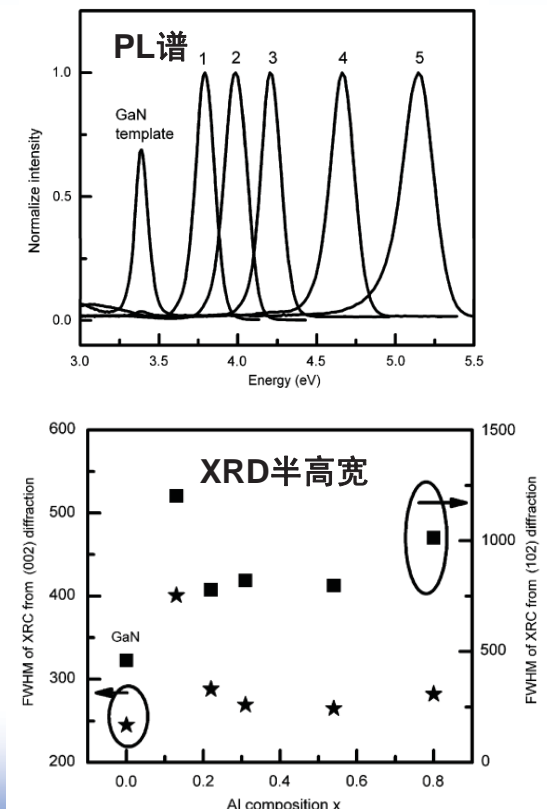
低离化率



日盲紫外探测器(240-280 nm)的研制主要来源于材料学方面的挑战:

- 无合适衬底造成的高缺陷密度、由张应力造成的薄膜破裂、及粗糙的表面形貌。
- 掺杂元素在高Al组份氮化物中的低离化率，及相应的高接触电阻。

高Al组分氮化物半导体外延生长研究

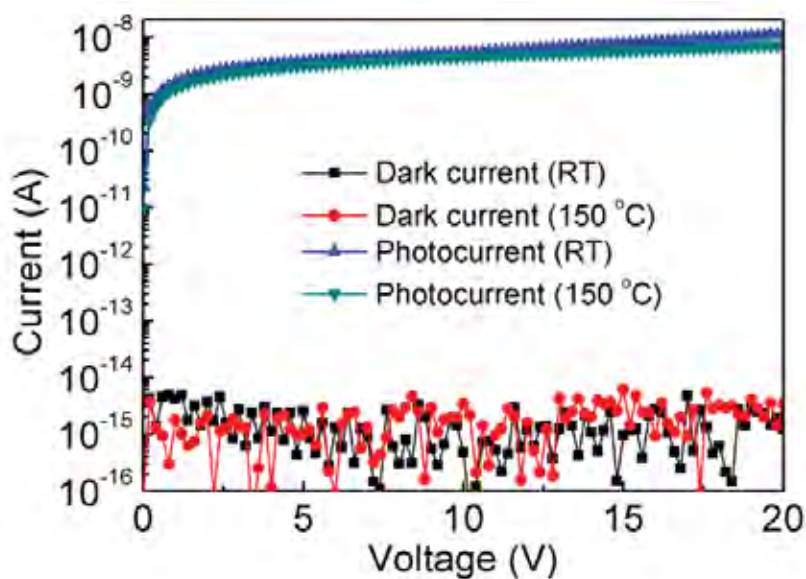
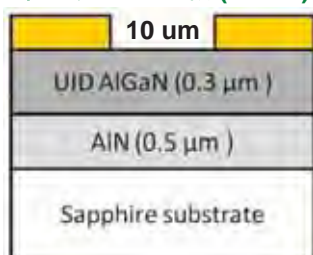


研制了Al组份含量广泛可调的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.13 < x < 0.8$) 系列合金半导体材料，材料具有较高的晶体质量；并通过发展高温AlN缓冲层技术，有效解决了常见的由张应力而引起的薄膜龟裂问题。

J. Cryst Growth 310, 4499 (2008)

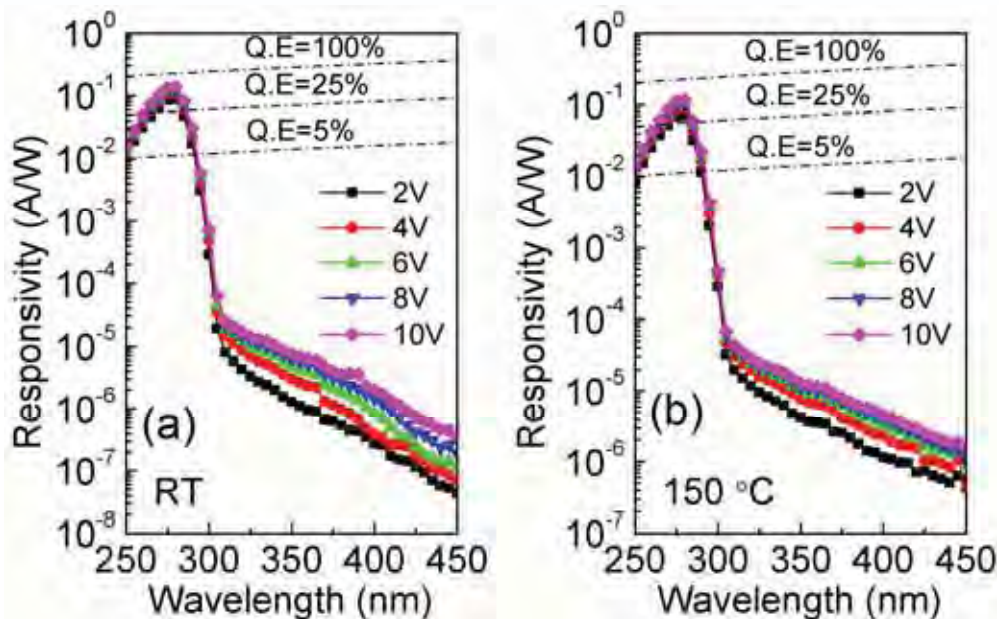
AlGaN基MSM日盲紫外探测器

半透明Ni/Au电极 (5/5nm)



通过发展特殊的表面处理工艺，有效抑制了探测器的暗电流：即使在150°C高温环境下，器件的暗电流仍在fA量级，为已报导的最低值。

高温等恶劣条件下的应用潜力



- 室温下 (10V): 最高量子效率64%, 抑制比 (275/350nm) $>1.8 \times 10^4$
- 150°C下 (10V): 最高量子效率51%, 抑制比 (275/350nm) $>8 \times 10^3$

IEEE Sensor Journal 12, 2086 (2012)

日盲紫外探测器工作多次
获得国际主流半导体技术
媒体的长文报道。



The most respected, authoritative and distributed platform connecting the community since 1988

- Home
- News
- Lab & Fab Talk
- Features
- Recruitment
- Events
- CS Magazine
- Sales Magazine
- Silicon Semiconductor Magazine
- Compound Semiconductor TV
- Editor's Guide
- Advertising
- Contact

3rd CS International Conference
Bringing together leading Compound Semiconductor industry insiders



CURRENT FEATURES

3rd CS International Conference
"Bringing together leading Compound Semiconductor industry insiders"

Solar-Blind AlGaN Photodetectors With Record-Low Dark Current
June 14, 2012

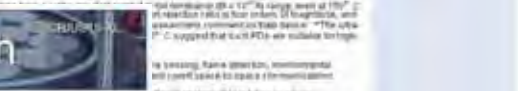
Advanced gallium nitride photodetectors have been fabricated by Chinese researchers using a proprietary high-temperature MOCVD process and a special surface treatment

A collaboration between researchers from Tsinghua University and Harvard School of Engineering Applied Sciences has developed a high quantum efficiency, AlGaN-based solar-blind photodetector with a very low dark current.

Despite their significant applications including missile plume sensing, environmental monitoring, ultraviolet-ultraviolet light detection, and solar physics, AlGaN-based solar-blind photodetectors commonly suffer from low quantum efficiency and a high dark current. This negatively affects their weak signal detection capability.

In order to address these issues, the researchers, led by Hui Lu, a professor at Tsinghua University, has fabricated a novel AlGaN-based solar-blind AlGaN photodetector using a proprietary high-temperature nitride growth process and a special surface treatment technique. They have created a device that they say has a record low dark current, not only at room temperature, but also at elevated temperatures.

The photodetector, grown on sapphire by MOCVD, consists of a high-temperature AlN buffer layer and an undoped Al_{0.2}GaN 0.8 layer. Standard optical lithography and lift-off techniques have been used to define the AlGaN semi-transparent interdigital contact electrodes. Before the deposition of the Schottky metal-to-been evaporated, a special surface chemical treatment was conducted.



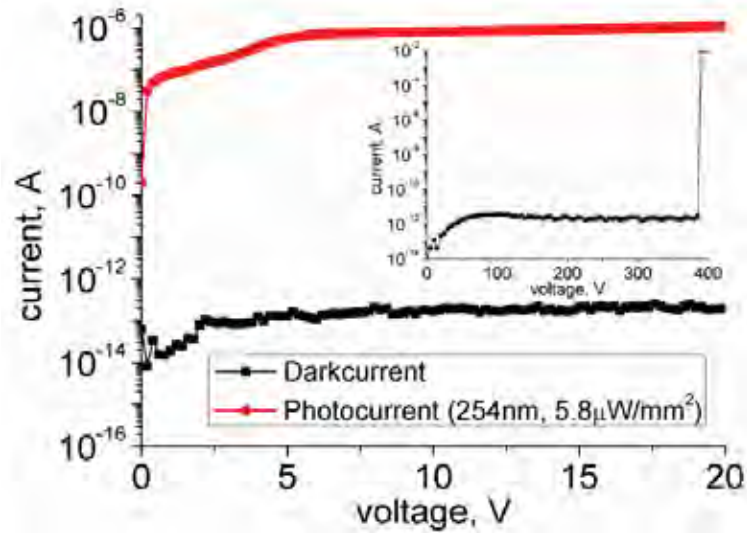
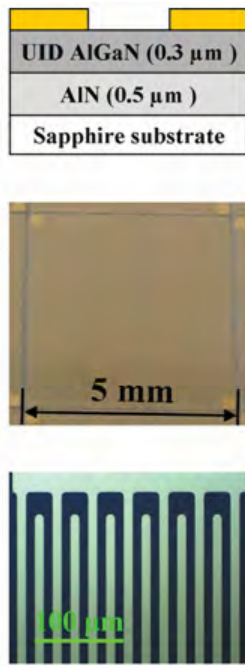
FREE SUBSCRIPTION
Subscribe & Mentee

Follow us on Twitter

CORPORATE PARTNERS



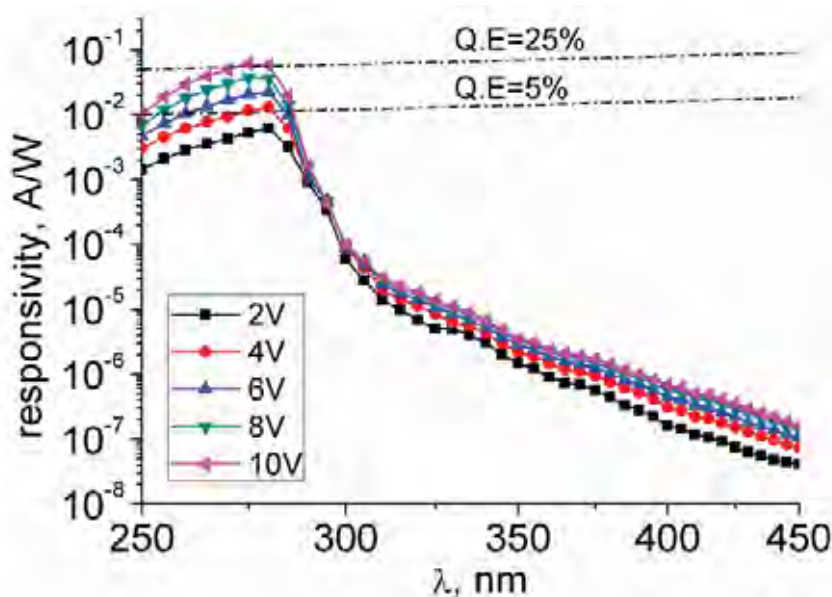
大尺寸 (5×5 mm²) AlGaN基MSM日盲紫外探测器



- 该器件为已报导最大尺寸AlGaN基日盲紫外探测器
- 暗电流密度为已报导最低 (3.2×10^{-12} A/cm², 20 V)

Electron Lett. 47, 930 (2011)

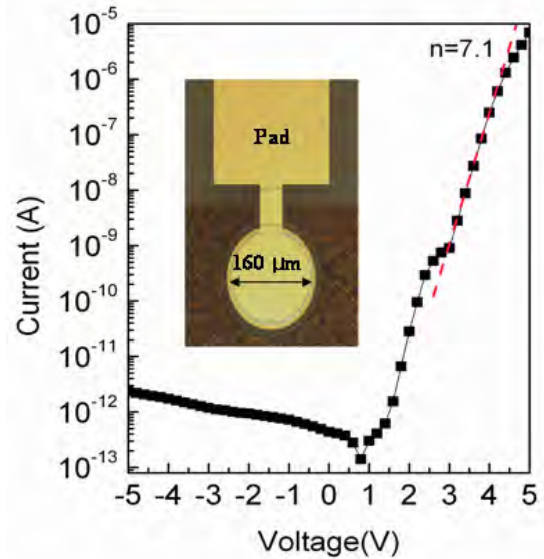
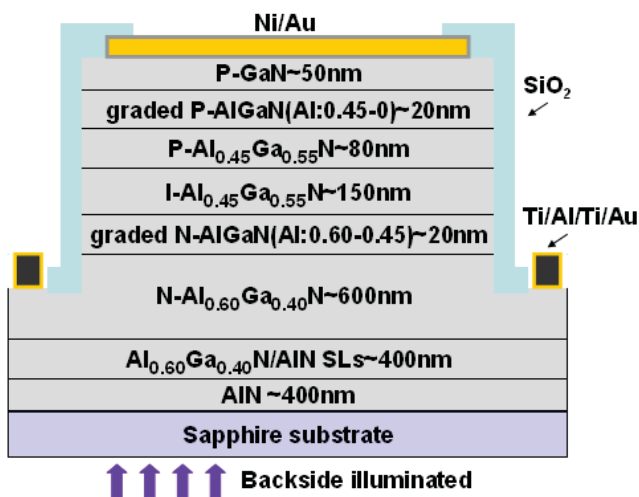
大尺寸日盲紫外探测器的光电响应特性



相关国际媒体报道

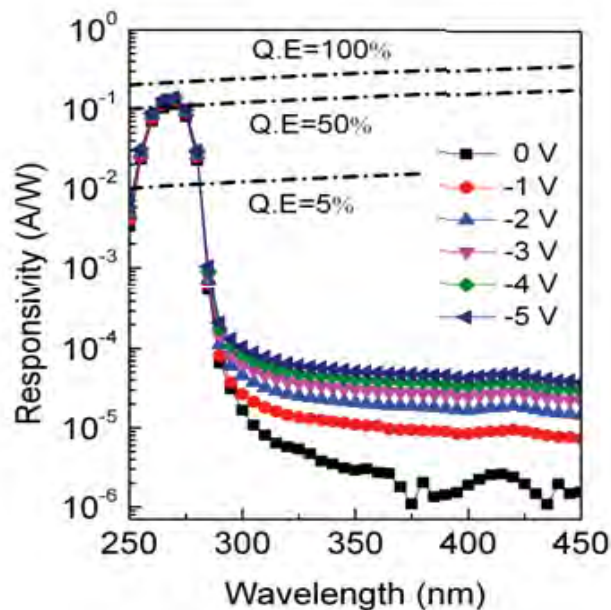
室温下，最高量子效率28% (10V偏压)，抑制比 (275/350nm) > 1×10⁴；证明外延材料具有良好的均匀性，适合制备大规模成像阵列。

背入射式AlGaN基PIN日盲紫外探测器



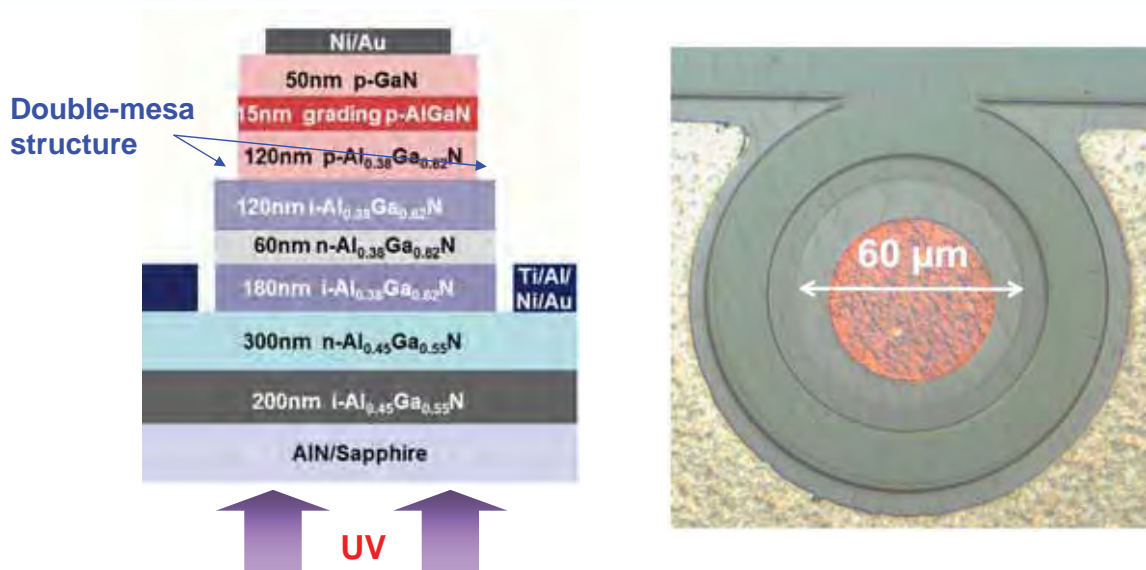
- 相比于MSM型日盲紫外探测器，PIN型日盲紫外探测器具有更高的填充因子，且可在PV模式下工作；但外延结构复杂，制备工艺要求高。
- 为了解决P型掺杂和接触问题，器件采用背入射结构；同时，为了提高光生载流子收集效率，外延层中包含多重组分缓变结构。

PIN日盲紫外探测器的光电响应特性



- 0V偏压下 (光伏模式)，探测器最高量子效率达52%，抑制比接近 10^5 ；
- 5V偏压下 (光导模式)，探测器最高量子效率达64%。

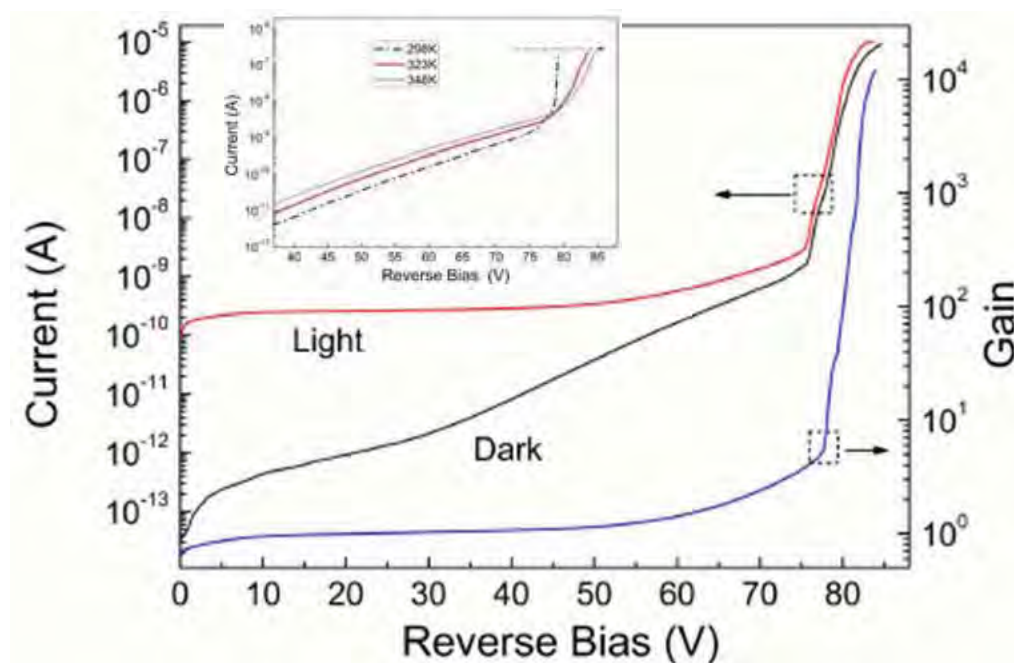
AlGaN基SAM结构APD



- SAM结构相比于常规PIN结构有利于降低探测器暗电流和噪音，并提高量子效率；
- 双台面结构 (double-mesa) 可有效降低台面边缘电场，抑制器件的暗电流。

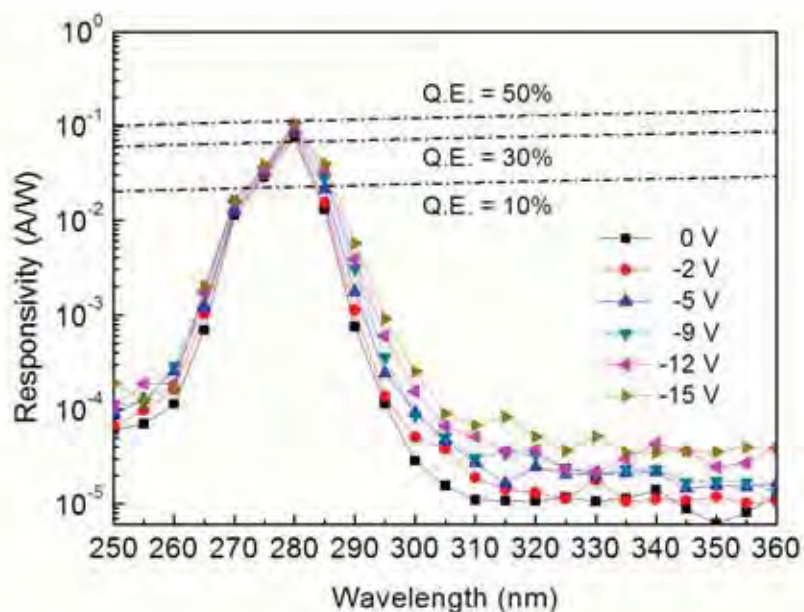
Appl Phys Lett 101, 253516 (2012)

AlGaN基日盲APD器件的雪崩增益性能



- APD器件的最高雪崩增益达10000，但器件的漏电流仍然偏高。

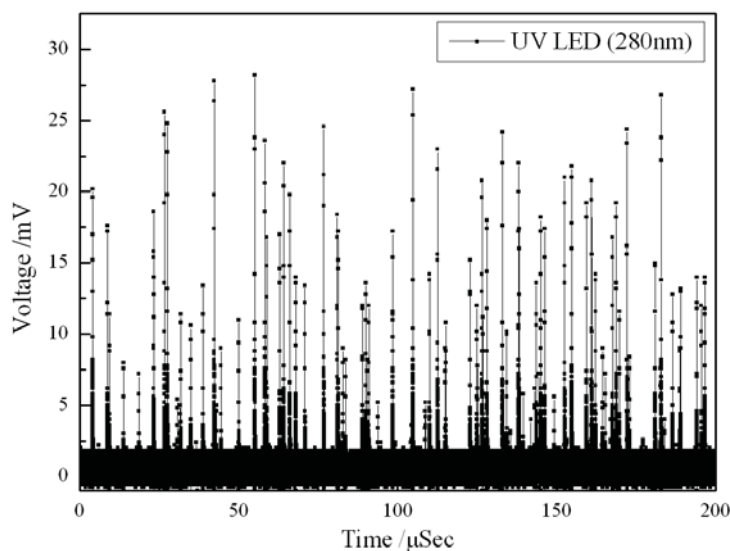
AlGaIn基SAM APD的光电响应特性



- 响应截止波长 ~ 280 nm, 日盲/紫外抑制比接近 10^4 ;
- 最高量子效率达到43% (-15V偏压下)。

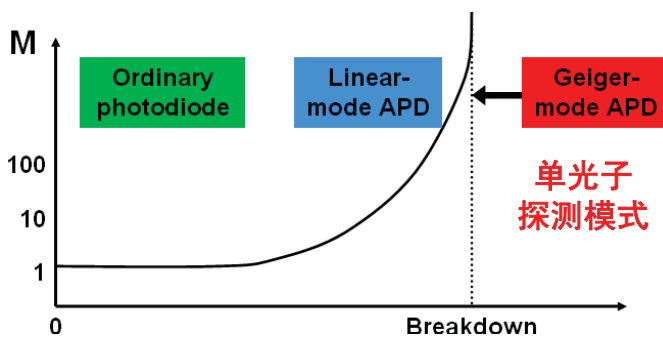
IEEE Electron Device Lett 35, 372 (2014)

SiC紫外单光子探测器

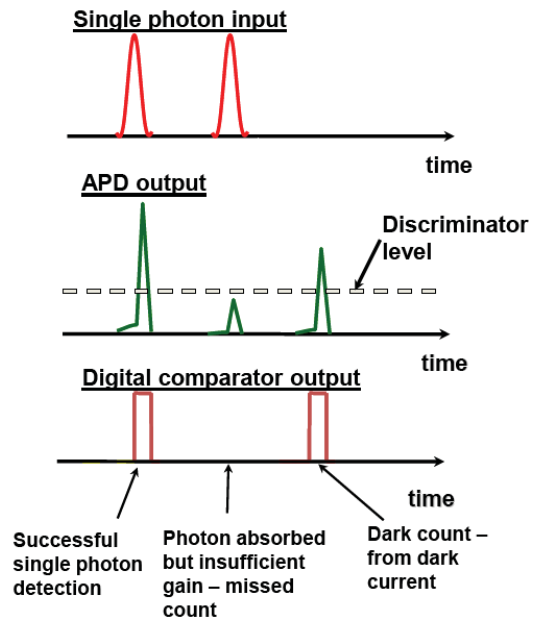


利用所研制SiC Gm-APD实时记录的单光子脉冲图谱

工作在Geiger模式 (单光子探测模式) 的APD器件



当外加偏压高于APD的击穿电压时，APD工作在Geiger模式；一旦有光生载流子进入高场区，就会形成大规模雪崩倍增 ($M > 10000$)。利用恰当的电流淬灭电路，可获得由单光子入射引发的数字信号脉冲。



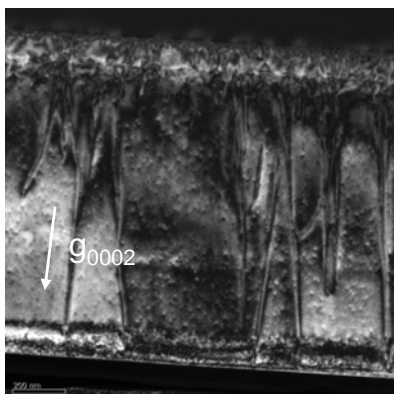
相关主要性能参数:

1. 单光子探测效率 (SPDE)
2. 暗计数 (DCR)

• AlGaIn材料体系成熟度仍不高，体现在所研制APD器件的成品率和可靠性都很低；因此，仍需要发展**横向外延或AlN衬底技术**等大幅提高材料质量。

• 从材料晶体质量的角度上看，SiC半导体已经可以基本满足APD的研制要求，这是利用SiC半导体来研制可见光盲紫外APD的重要优势。

AlGaIn薄膜暗场XTEM照片



位错密度: $\sim 10^8 - 10^9 \text{ cm}^{-2}$

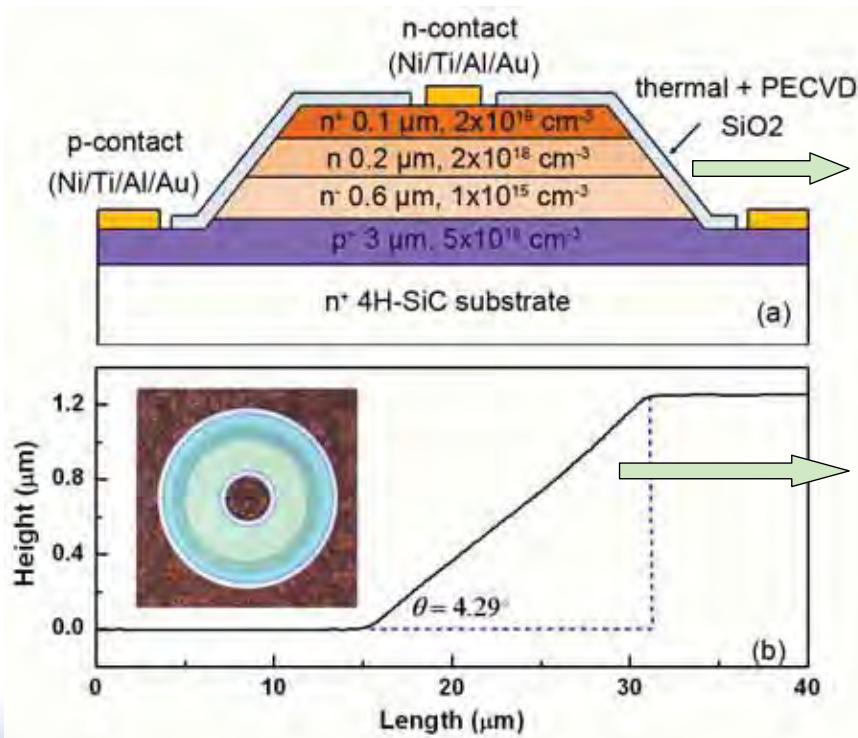
商用4H-SiC单晶衬底



位错密度: $\sim 10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-2}$

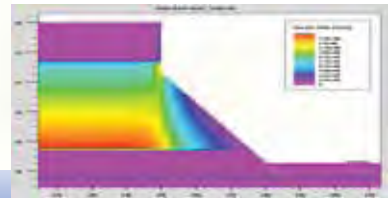
VS

SiC基APD器件的设计与工艺开发

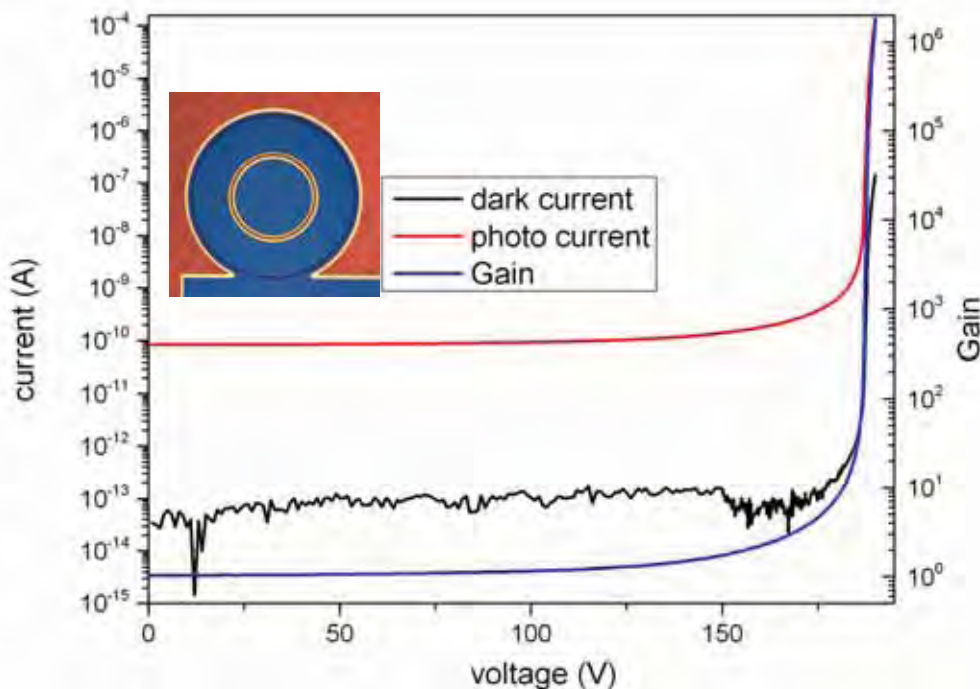


发展了有效的高温钝化工艺，有效抑制了器件的表面漏电流。

形成positive bevel台面对抑制器件的隧穿电流非常有效。

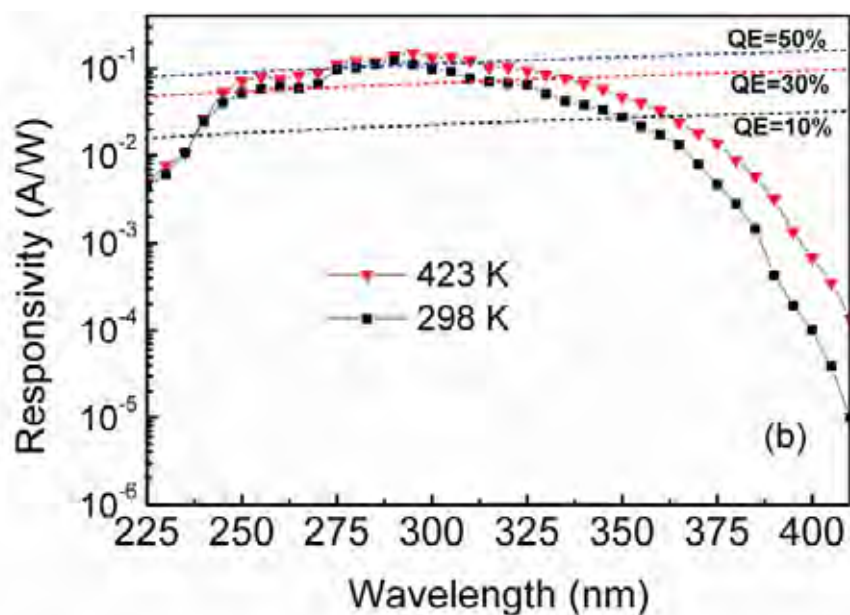


SiC基APD器件的雪崩增益特性



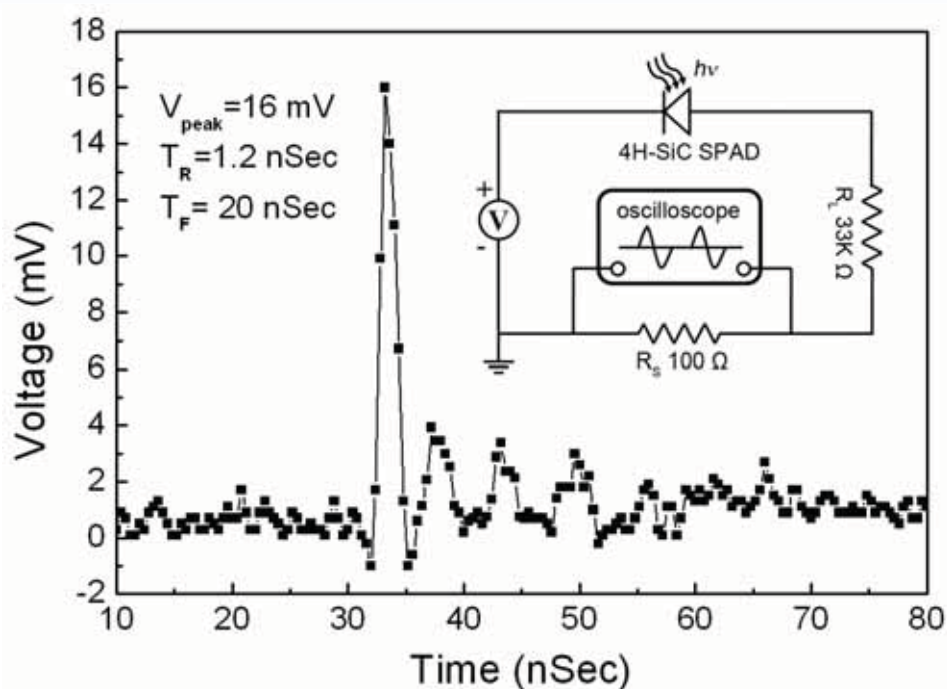
- 可获得很低的暗电流，雪崩发生前保持在10⁻¹³A量级；
- 190V偏压下，雪崩增益大于10⁶，进入Geiger工作模式。

SiC基APD器件的光谱响应特性



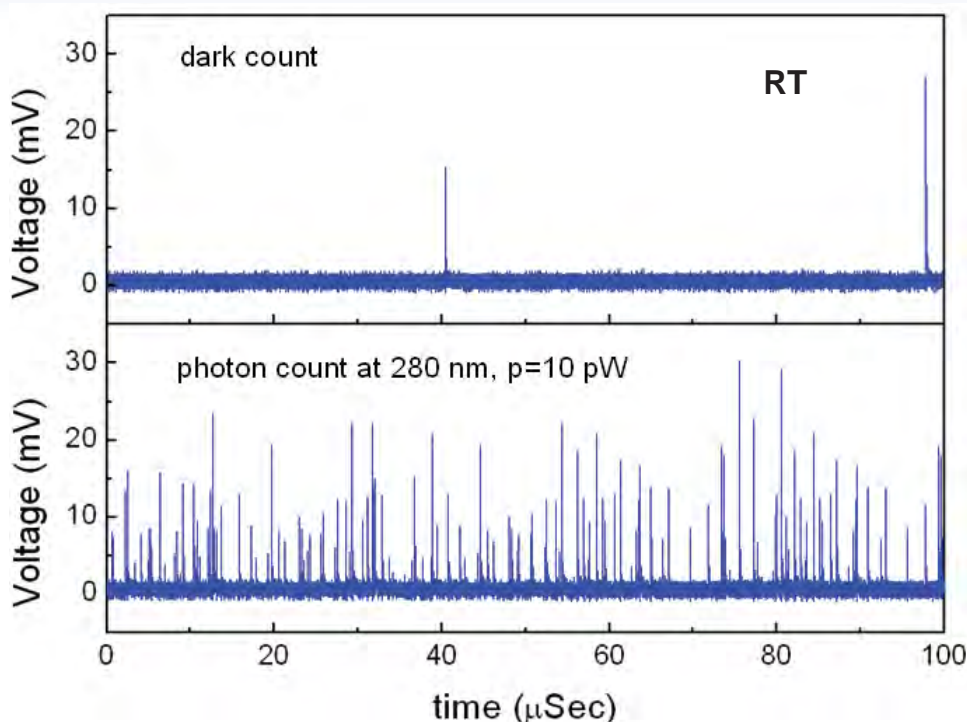
- 实现可见光盲响应，响应峰值在290nm附近。

SiC单光子APD的单个紫外光子计数脉冲



- 如使用门控主动电流淬灭方法，该APD器件的性能可大幅提升。

SiC单光子APD的实时暗计数与紫外光子计数



- **室温下**，单光子探测效率在6%时，APD器件的暗计数率约在22KHz；
- **150°C高温下**，单光子探测效率在6%时，APD器件的暗计数率约在80KHz。

《Semiconductor Today》以“使用SiC半导体提升高温环境下的单光子探测性能”为题长文报道我们的工作

总结

1. 由于其优异的材料性能，以III族氮化物和SiC为代表的宽禁带半导体是制备紫外探测器件的优选材料；
2. 常规结构GaN基紫外探测器已经达到产业化水平；
3. 材料的晶体质量仍是限制宽禁带半导体紫外探测器性能的关键因素，特别是(AI)GaN基APD；
4. 由于材料成熟度较高，SiC紫外单光子探测器已经可以实现良好的性能，具有重要应用前景。



致谢

- 南京大学：谢自力教授，刘斌副教授
- 电科五十五所：李亮博士、周建军博士
- 参与相关研究工作的研究生：谢峰、周东、邵振广、王国胜等
- 自然科学基金和国家863计划项目的资助

