

# 电极形状与紫外探测器灵敏度关系的研究

吕惠民<sup>1,2</sup> 陈光德<sup>1</sup> 苑进社<sup>1,2</sup>

(1 西安交通大学应用物理系, 西安 710049)

(2 西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

**摘 要** 在传统工艺的基础上, 改变电极的形状可以提高氮化镓(GaN)基材料光导型紫外探测器的灵敏度. 经过计算可知, 虽然三棱形电极可以使探测器有效受光率提高 100%, 但工艺复杂, 难以实现; 而半圆柱形电极虽然使氮化镓薄膜有效受光率仅提高 20% 左右, 但工艺简单, 便于加工.

**关键词** 紫外探测器; 电极; 加工工艺

**中图分类号** TN304.23

**文献标识码** A

## 0 引言

氮化镓(GaN)属直接带隙半导体材料, 其稳定的物理和化学性质及 3.4 eV 的室温禁带宽度, 使其在光电子学和微电子学领域具有广阔的应用前景. 20 世纪 90 年代后期, 随着氮化镓材料外延生长技术的改进和 P 型掺杂技术的突破, GaN 基材料与器件的应用已取得了重大进展. GaN 基材料光导型紫外探测器可用于监测地球大气中臭氧层的变化, 探测火箭尾焰, 监控火灾等众多领域<sup>[1]</sup>.

世界上第一个 GaN 基材料光导型紫外探测器于 1992 年由 M. Asif Khan 等人研制成功, 其峰值响应度为  $10^3$  A/W, 响应时间为 1 ms<sup>[2]</sup>. 从此, GaN 基材料光导型紫外探测器的研究成为了一个热点之一<sup>[3]</sup>. 目前的研究主要集中在各种现象的观察和器件性能测试上<sup>[4~10]</sup>. 这些成果的共同之处在于均采用梳状电极, 光电流强度在紫外波段( $\lambda < 365$  nm)比可见光波段( $\lambda > 380$  nm)高出大约 3 个数量级, 在 5~6 V 偏压下的响应度达到饱和, 响应时间在 ms 数量级, 单元面积在  $1 \text{ mm}^2$  以下<sup>[2]</sup>. 但电极的分布及形状对紫外探测器性能有何影响的报道尚未发现.

## 1 现行电极的不足

目前, GaN 基材料光导型紫外探测器均采用在 GaN 薄膜上直接镀一层厚度大约  $0.5 \mu\text{m}$  的梳状金属材料(如: Au 等)形成并联电极, 如图 1, 电极间距一般大于金属电极本身的宽度, 其局部断面如图 2. 由于金属电极的覆盖、引线的遮挡, 尤其是实用性的探测器往往被探测的紫外线强度远比实验室所采用的氙灯(Xenon Lamp)的发光强度小得多, 因此, 要使探测器能探测得到那些紫外信号, 就必须提高探测器的灵敏度. 为此, 在探测器的结构(如: 电极的

大小、形状、间距、氮化镓的有效受光面积等)、光源距离和发光强度不变的条件下, 如果能提高探测器上氮化镓薄膜单位表面面积的受光强度, 对提高探测器的灵敏度就显得十分重要. 本文分别对两种电极形状的变化对提高探测器上氮化镓薄膜单位表面面积的受光强度的影响进行了理论研究, 仅供各位从事氮化镓紫外探测器研究的科技工作者参考.

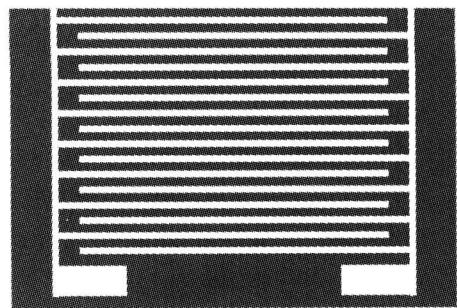


图 1 探测器梳状电极

Fig. 1 Interdigitated electrode detector

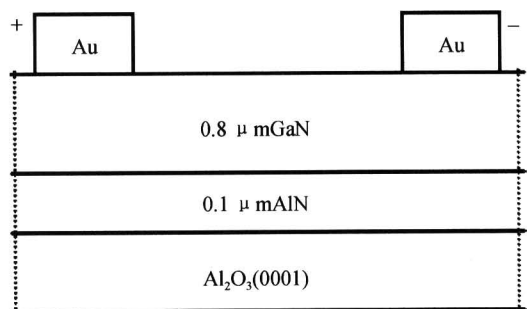


图 2 探测器局部截面图

Fig. 2 Local cross section of detector

## 2 两种电极形态方案

为了使得照射到电极上的紫外线尽可能多的到达氮化镓薄膜表面而成为有效光线, 在光源距离不变的条件下, 提高探测器的光电流, 本文提出两种电极形态方案, 如图 3(a) 和图 4(a).

### 2.1 三棱状电极

#### 2.1.1 理论推导

设照射到探测器上的光为平行光(即待探测光

源在无限远处),且垂直入射到探测器表面. 由几何光学可知,只要照射到 AC 面上靠近 C 点的光线经 AC 面反射后正好到达 A' 点,那么,照射到 AC 面上的所有光线均能经 AC 面反射到 A-A' 之间的 GaN 薄膜表面上. A'C' 面与 AC 面效果相同. 且假设裸露的 GaN 表面宽度是电极覆盖在 GaN 表面上的宽度一半的  $n$  倍.

下面推导  $n$  与 AC 面倾角  $\alpha$  的关系.

如图 3(b). 由反射定律可知,反射角等于入射

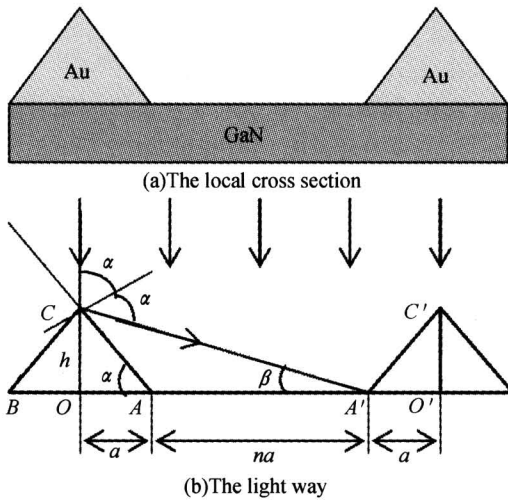


图 3 三角形电极  
Fig. 3 Triangular electrode

角,均等于  $\alpha$ . 由几何关系得

$$2\alpha - 90^\circ = \beta \tag{1}$$

$$a \cdot \tan \alpha = (n+1)a \cdot \tan \beta \tag{2}$$

将式(1)代入式(2),并经推导、整理得

$$\cos^2 \alpha = \frac{n-1}{2n}, \text{ 即 } \cos \alpha = \sqrt{\frac{n-1}{2n}} \tag{3}$$

表 1 倍数  $n$ 、倾角  $\alpha$  和电极高度  $h$  及有效受光率  $\eta$  的关系

$n$	2	3	4	5	6	$\infty$
$\cos \alpha$	0.500	0.577	0.612	0.632	0.645	0.707
$h$	$1.73a$	$1.42a$	$1.29a$	$1.23a$	$1.19a$	$h \leq a$
$\eta$	100%	66.7%	50.0%	20.0%	33.3%	0%

### 2.1.2 结果分析

1) 在保证照射到电极上的紫外光经反射后能到达 A-A' (GaN) 面的前提下,探测器上 GaN 的宽度与电极底宽之比越大,则要求电极的高度就越小. 但当三棱电极高度降低到电极底宽一半(即  $\alpha = 45^\circ$  或  $h = a$ )时,无论相邻平行电极间隔多远,照射到电极上的紫外光经反射后均不能到达 GaN 薄膜面上,即倾角  $\alpha \leq 45^\circ$  的电极对提高探测器的有效受光率无意义.

2) 以电极底宽与电极间距为 1:1 的情况为例,电极的高度  $h$  只要达到  $1.73a$ ,就可使入射到电极上的紫外光都能反射到氮化镓表面上(设电极表面

反射率为 1). 但是,电极高度过大,不但制造工艺难度加大,而且在大多数情况下,很难保证光线垂直入射,此时的电极会形成比较大的阴影,同样对提高探测器的有效受光率无意义.

3) 一般情况下,电极间距不宜过大,否则,电极间形成的过高阻会降低探测器的灵敏度. 反之,间距过小,在探测器总受光面积一定的前提下,氮化镓薄膜直接受光面积相对减小,即使有反射来的紫外光,因电极的反射率不可能达到 100%,同样会影响探测器的灵敏度. 一般情况下,只要电极斜面倾角满足  $45^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ ,此电极都会不同程度地提高探测器的灵敏度. 但综合以上因素, $\alpha$  角取  $52^\circ$  左右(即  $h \approx 1.3a$ )比较合适.

## 2.2 半圆柱形电极

### 2.2.1 理论推导

如图 4(b),设半圆柱电极的曲率半径为  $a$ ,电极间距为  $na$ ,其它条件与上同.

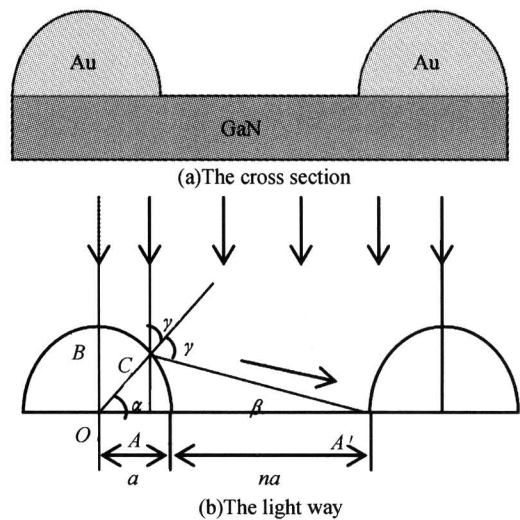


图 4 半圆柱形电极  
Fig. 4 Half-cylinder electrode

由几何关系可得

$$90^\circ - \alpha = \alpha + \beta$$

即

$$\beta = 90^\circ - 2\alpha \tag{4}$$

$$a \cdot \sin \alpha = [na + (a - a \cos \alpha)] \tan \beta \tag{5}$$

将式(4)代入式(5),并利用三角关系,经推导整理得

$$2(n+1)\cos^2 \alpha - \cos \alpha - (n+1) = 0 \tag{6}$$

此方程的有效解为

$$\cos \alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 8(n+1)^2}}{4(n+1)} \tag{7}$$

定义:光照的有效提高率( $\eta$ )为在光垂直照射,且忽略材料对光的吸收的情况下,经电极反射到达 GaN 表面的光强与不经电极反射直接到达 GaN 表面的光强之比. 根据方程(7),可以计算出不同电极间距

条件下 GaN 薄膜表面的光照的有效提高率  $\eta$  的值如表 2.

表 2 倍数  $n$  与 GaN 表面有效受光率  $\eta$  的关系

$n$	2	3	4	5	6	7	8
$\cos \alpha$	0.795	0.773	0.759	0.750	0.743	0.738	0.736
$\eta$	20.5%	15.1%	12.1%	10.0%	8.6%	7.5%	6.6%

### 2.2.2 结果分析

1) 在假定电极表面反射率为 1 的前提下, 当电极覆盖 GaN 薄膜表面的宽度等于电极间隔宽度时, GaN 薄膜表面的有效受光率可以提高 20.5%, 效果是十分明显的.

2) 在电极曲率半径不变的情况下, 电极间距越大, GaN 薄膜表面的受光强度的提高率随之减小, 且变化趋势越来越趋于平缓.

3) 一般情况下, 电极间距是电极曲率半径的数倍, 这样, 既不会在电极之间形成过高阻, 又不至于用于受光的氮化镓薄膜表面积过小. 在此情况下, 由表 2 可知, 半圆柱形电极可以使氮化镓表面的受光率提高 10% 左右.

## 3 两种电极优缺点比较

1) 单从提高探测器上氮化镓薄膜表面受光率方面来看, 只要按计算的电极与间距的比例加工探测器的电极, 三棱柱形电极优于半圆柱形电极.

2) 从加工工艺的难易程度方面来看, 半圆柱形电极要比三棱柱形电极简单得多. 只要在传统的工艺过程中, 掌握好金属电极的厚度, 使传统的矩形电极与半圆形电极的横截面积相等, 并加热探测器至电极金属的熔点(如: 金, 其熔点为 1064℃), 使金属熔化, 在表面张力的作用下, 线状电极会自动变成半圆柱状电极, 随后冷却即可. 因半导体材料(如: Si, 其熔点为 1462℃; GaN 的熔点更高)熔点相对较高, 故不会对 GaN 膜的性质产生影响. 半圆形电极还有容易保洁等特点.

## 4 总结

通过对两种不同形状电极对探测器受光率提高的分析, 我们已经知道, 只要将传统电极的形状改变一下, 就可以在一定程度上提高紫外探测器的受光

率, 从而达到提高探测器灵敏度的效果. 综合前面分析结果, 半圆柱形电极虽然对紫外探测器受光率的提高没有三棱形电极那么显著, 但它工艺简单, 便于加工.

### 参考文献

- Walker D, Zhang X, Kung P, *et al.* AlGaIn ultraviolet photodetectors grown on sapphire. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(15): 2100~2101
- Asif Khan M, Kuznia J N, Olson D T, *et al.* High-responsivity photoconductive ultraviolet sensors based on insulating single-crystal GaN epilayers. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**(23): 2917~2919
- 范隆, 郝跃, 冯倩, 等. SiC/AlN 上外延 GaN 薄膜的黄带发光与晶体缺陷的关系. *光子学报*, 2003, **32**(8): 977~980
- Fan L, Hao Y, Fen Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 977~980
- Walker D. High-speed, low-noise metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on GaN. *Appl Phys Lett*, 1999, (74): 762~767
- Asif Khan M, Kuznia J N, Bhattarai A R, *et al.* Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. *Appl Phys Lett*, 1993, **62**(15): 1786~1787
- Misra M. Photoconductive detectors based on partially Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alloys grown by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1999, (74): 2203~2207
- Omnes F. Low pressure MOVPE grown AlGaIn for UV photodetector applications. *Materials Science and Engineering*, 1999, **B**(59): 401~404
- Xu H Z. Fabrication and characterization of MSM ultraviolet photodetectors on undoped GaN/Sapphire grown by MBE. *J Cryst Growth*, 2000, (218): 1~6
- Asif Khan M, Kuznia J N, Olson D T. Microwave performance of a 0.25  $\mu\text{m}$  gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor. *Appl Phys Lett*, 1994, **65**(9): 1121~1123
- 冯倩, 段猛, 郝跃. SiC 衬底上异质外延 GaN 薄膜结构缺陷对黄光辐射的影响. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1340~1342
- Feng Q, Duan M, Hao Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1340~1342

## The Relation Between The Electrode Shape and The Sensitivity of Photoconductive Ultraviolet Detectors

Lü Huimin<sup>1,2</sup>, Chen Guangde<sup>1</sup>, Yuan Jinshe<sup>1,2</sup>

*1 Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*

*2 Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048*

Received date: 2005-02-19

**Abstract** Based on the conventional technology, the sensitivity of GaN-based Photoconductive Ultraviolet Detectors is improved by changed electrode shape. According to theoretical calculation, the receivable ultraviolet ray intensity of detectors with triangular and half-cylinder electrode is increased by 100% and 20% respectively, and half-cylinder electrode, to triangular electrode extremely difficult processed, be possessed of a simple and easy manufacturing technology.

**Keywords** Ultraviolet detectors; Electrode; Making technology



**Lü Huimin** is a native of Shaanxi Province, China. He is a physics teacher of science school in Xi'an University of Technology. His main work is teaching basic courses, specialized courses, etc. He is also engaged in research on technology and application of the pressure sensor and the GaN material. Now he is studying for his Ph. D. Degree.