

GaN/6H-SiC 紫外探测器的光电流性质研究

臧 岚 杨 凯 张 荣 沈 波 陈志忠 陈 鹏 周玉刚 郑有

(南京大学物理系 南京 210093)

黄振春

(NASA Goddard Space Flight Center, Code 718, Greenbelt, MD 20771, U SA)

摘要 本文研究了以金属有机物化学气相沉积方法生长在 6H-SiC 衬底上的 GaN 外延薄膜制成的光导型紫外探测器的光电流性质。通过对其光电流谱的测量, 获得了 GaN 探测器在紫外波段从 250~ 365nm 近于平坦的光电流响应曲线, 并且观察到在~ 3.4eV 带边附近陡峭的截止边, 即当光波长在从 365nm 变到 375nm 的 10nm 区间内, 光电流信号下降了 3 个数量级。在 360nm 波长处, 我们测得 GaN 探测器在 5V 偏压下光电流响应度为 133A/W, 并得到了其响应度与外加偏压的关系。通过拟合光电流信号强度与入射光调制频率的实验数据, 我们获得了 GaN 探测器的响应时间及其与偏压的关系。

PACC: 7240, 6855

1 引言

氮化镓(GaN)是一种宽禁带的直接带隙半导体。由于它在微电子与光电子学领域的应用潜力^[1,2], 近年来成为半导体材料研究的新热点。GaN 作为高效率的蓝光与紫外光电发射器件^[3,4]的一种重要材料, 得到了广泛的研究和应用。随着 GaN 基材料与器件制备工艺的发展, 对于以前半导体技术所不能涉及的蓝光到紫外光这一波段区间, 现在得到了开发与利用。GaN 材料有着很宽的直接带隙, 很高的击穿场强, 很高的热导率和非常好的物理、化学稳定性, 使它适用于蓝光及紫外光发射器件, 紫外光电探测器和高温大功率管的研制。由于 GaN 基材料外延技术的进步, 高质量的单晶 GaN 薄膜目前已经用各种制备方法获得, 其中包括金属有机物化学汽相沉积(MOCVD)^[5~8]和分子束外延(MBE)^[9]。光导型紫外探测器^[10,13], 蓝光发光二极管(LEDs)^[6], 蓝光激光二极管(LDs), 金属半导体场效应管(MES-

臧 岚 男, 1973 年出生, 硕士研究生, 现从事 GaN 蓝光材料的光学性质的研究

杨 凯 男, 1971 年出生, 博士研究生, 主要从事 GaN 基蓝光半导体材料制备及其性质研究

张 荣 男, 1964 年出生, 教授, 目前主要从事 GaN, SiC 半导体蓝光材料和器件的研制及其性质研究
1997-01-19 收到, 1997-04-22 定稿

FETs)^[5]和异质结场效应管(HFETs)^[7]等都已研制成功

本文报道了以MOCVD方法生长在6H-SiC衬底上的基于GaN外延层的光导型紫外探测器的性质。从理论上讲, GaN探测器对能量大于3.4eV的光子有很大的响应度。这个性质使它极适用于在红外及可见光背景下探测紫外辐射, 所以GaN紫外探测器无论在军用还是在民用上都有重要应用价值。Joshi等人通过数值模拟估算出金属-半导体-金属型GaN探测器具有小到几个皮秒的响应时间^[11], 而且GaN薄膜有着较大的光吸收深度, 使GaN光电探测器避免了由表面复合和表面散射引起的一系列问题。在本文中, 光电流谱(PC谱)显示了~3.4eV处的陡峭的截止边和对紫外光波段的持续光电流响应。我们采用一种简便的方法确定了GaN紫外探测器的响应时间, 并讨论了在紫外光波段的光电导性质。

2 实验

实验样品是基于MOCVD方法生长在6H-SiC衬底上的单晶六角Ga₂N₃薄膜的紫外探测器。外延层生长采用三甲基镓(TM Ga)和高纯氨气(NH₃)作为生长源, 利用氢气作为载气, 生长中运用了薄的Ga₂N₃缓冲层(~25nm)。外延层薄膜厚度由光反射谱的干涉峰测定为1.2μm, 样品为非故意掺杂n型, 电子载流子浓度的典型值约为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

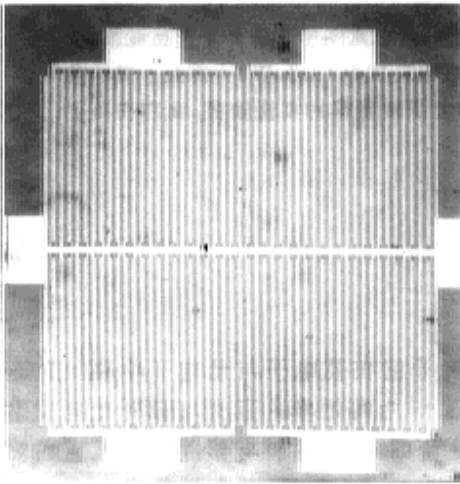


图1 GaN紫外探测器电极的显微镜图象

利用GaN外延层制备光导型紫外探测器, 并采用标准的光刻工艺作成梳状电极, 如图1所示。梳状金电极每条宽为5μm, 长0.5mm, 间隔为10μm。每组探测器图形感光表面积约为1.0mm², 其中每个探测单元的感光面积为0.25mm²。利用半导体参数分析仪测量了样品的伏安特性, 伏安特性正反向均为线形, 表明良好的欧姆特性, 其中GaN探测器的暗电阻测得为120Ω。

光电流谱的测量采用了500W风冷氙灯, 光栅单色仪, 机械斩波器和锁相放大器(EG & G 5210型)等设备。光电流测量电路是一个包括直流稳压源, GaN光电探测器和取样电阻的回路。在光照和无光照的条件下, GaN紫外探测器的光生电流可通过取样电阻两端的电压变化经过锁相技术测得。

3 结果和讨论

在测量光电流谱的过程中, 光源是经过30Hz机械斩波的高压氙灯, GaN探测器偏压为5V。我们测得了光电流强度随入射光波长变化的光电流响应谱。测量过程由计算机控制并采集数据, 光电流信号由锁相放大器读入, 并考虑了氙灯发射灯谱对光电流大小的影响, 作了修正。图2给出了在5V偏压下GaN紫外探测器的光电流谱。如图2所示, 探测器光响应从380nm一直延伸到紫外波段, 在365nm(~3.4eV)附近达到最高值, 然后几乎平坦地延

伸到 250nm, 光电流响应信号在紫外波段 ($\lambda < 360\text{nm}$) 比可见光波段 ($\lambda > 380\text{nm}$) 高了 3 个数量级左右 在带隙以下的光响应主要来自于禁带内的能级跃迁 正如光致发光谱的类似结果, 这些带内光电谱响应主要是由 GaN 薄膜中的缺陷和杂质引起的

为了确定 PC 谱中的峰值响应度, 我们利用一个校定的硅紫外探测器测量了 360nm 处氙灯的灯谱强度, 考虑到所用硅探测器和 GaN 探测器的感光面积的不同, 得到 GaN 紫外探测器在 5V 偏压下的响应度为 133A/W . 为了进一步研究 GaN 探测器的性质, 我们测量了 GaN 探测器光电流响应和外加电场的关系, 如图 3 所示, 当偏压在 6V 以下, 探测器响应近乎线性增长, 在 6V 以上则趋于饱和, 这种饱和行为可以用扫场效应 (sweep-out effect) 加以解释^[12, 14].

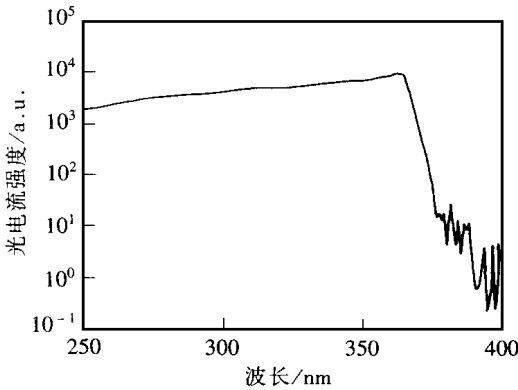


图 2 GaN 紫外探测器的光电流谱
外加偏压为 5V

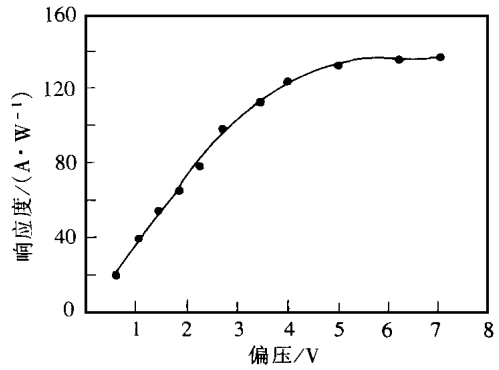


图 3 探测器响应与外加偏压的关系

最后我们采用一种简便的方法取代了脉冲激光器得到 GaN 探测器的时间常数 由于实验中使用的光源为氙灯经机械斩波的方波光脉冲, 在有光的半个周期中, 探测器中大量产生光生载流子, 在无光的半个周期中光生载流子 (非平衡载流子) 由于复合作用而迅速减少 在足够长的时间内, 这一过程趋于一个稳定的平衡状态 当达到平衡后, 极大值和极小值之差决定了锁相放大器测得的光电流响应信号的强弱 由于样品为非故意掺杂 n 型, 我们只考虑电子载流子的影响, 则可以列出方程:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = I\eta - \frac{1}{\tau}n & (NT \leq t < (N + 1/2)T) & (1) \\ \frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\tau}n & ((N + 1/2)T \leq t < (N + 1)T) & (2) \end{cases}$$

式(1)和式(2)中 I 为光信号入射强度; η 为样品吸收的量子效率, 则 $I\eta$ 为样品内产生的非平衡载流子浓度; τ 为响应时间; n 为样品中载流子浓度; $\frac{1}{\tau}n$ 为单位时间样品内因复合作用减少的载流子浓度 假定 NT 至 $(N + 1)T$ 表示第 N 个脉冲光信号输入过程, 解上面的这个方程, 考虑达到平衡后的极值之差, 由锁相放大器测得的 GaN 探测器的响应为

$$\Delta A = A_0 \tanh((4\tau f)^{-1})$$

其中 τ 为响应时间; A_0 为与频率 f 无关的常数 我们通过改变入射光信号的调制频率 f , 测得一系列的光电流响应强度, 通过对测量数据的拟合, 可以得到响应时间 τ 的值 如图 4 所示, 图中连线为拟合曲线, 点为实验数据 所测探测器响应时间主要包括两个部分, 载流子

寿命 (lifetime of carriers) τ_0 和俘获时间 (trapping time) τ , 后者在这里是主要因素。虽然陷阱作用能增强光电流的强度, 但随着 τ 的增大, 探测器的响应时间将同时增大。

利用以上方法, 我们获得了 GaN 探测器响应时间随偏压的变化, 如图 5 所示, 通过对实验数据拟合, 在 5V 偏压下探测器的响应时间测定为 6ms。由图 5 可以看到随着 GaN 探测器

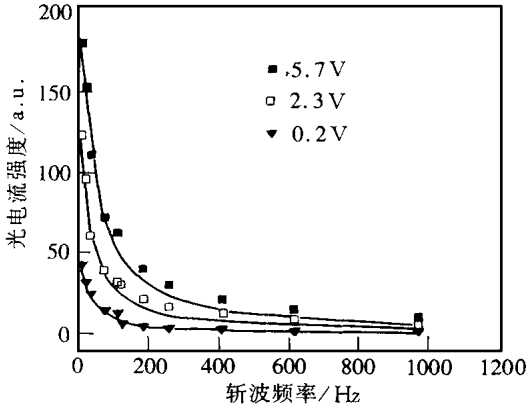


图 4 探测器响应与斩波频率的关系

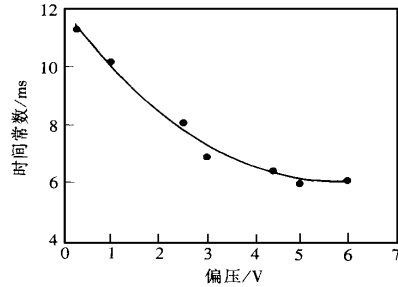


图 5 探测器时间常数与外加偏压的关系

外加偏压的增大, 响应时间单调地下降, 这主要是由于光导型探测器电极间扫场强度增加的结果。此类 GaN 光导型探测器的时间常数为 ms 量级, 带通为 1kHz, 该器件已经能适用于一些实际的应用, 如火灾检测, 红外光、可见光背景下的紫外光辐射探测等。

4 结论

本文主要研究了用 MOCVD 方法生长在 6H-SiC 衬底上的 GaN 外延层的紫外探测器。我们通过测量光电流谱得到 GaN 探测器的光电流响应在 365nm ($\sim 3.4\text{eV}$) 左右有一个陡峭的截止边, 并且其光电流信号近于平坦地一直延伸到紫外波段。在 5V 偏压下, GaN 探测器在 360nm 处的响应度测定为 133A/W , 并得到了响应度随外加电场的变化曲线。此外我们得到一种较为简便的测量探测器时间常数的方法。

参 考 文 献

- [1] S. Strite and H. Morkoc, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992, **B10**(4): 1237.
- [2] H. Morkoc, S. Strite, G. B. Gao *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(3): 1363.
- [3] S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**: 2390.
- [4] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**: 5543.
- [5] M. A. Khan, J. N. Lutzia, A. R. Bhattarai *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(15): 1786.
- [6] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(13): 1687.
- [7] M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(9): 1121.
- [8] K. G. Fertitta, A. L. Holmes, J. G. Neff *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(14): 1823.
- [9] R. Singh, R. J. Molnar, M. S. Unlu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(3): 336.

- [10] M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson *et al* , Appl Phys Lett , 1992, **60**(23): 2917.
[11] R. P. Joshi, A. N. Dharamsi and J. McAdoo, Appl Phys Lett , 1994, **64**(26): 3611.
[12] D. Walker, X. Zhang, P. Kung *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **68**(15): 2100.
[13] K. Yang, R. Zhang, L. Zang *et al* , Mat Res Soc Symp. Proc , 1997, **449**: (to be accepted).
[14] K. Yang, L. H. Qin, R. Zhang *et al* , Chin Phys Lett , 1996, **13**(11): 874

Photocurrent Studies of Ultraviolet Detector Based on GaN/6H-SiC

Zang Lan, Yang Kai, Zhang Rong, Shen Bo, Chen Zhizhong,
Chen Peng, Zhou Yugang and Zheng Youdou

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Huang Zhenchun

(NASA Goddard Space Flight Center, Code 718, Greenbelt, MD 20771, USA)

Received 19 January 1997, revised manuscript received 22 April 1997

Abstract The photocurrent properties of the conductive ultraviolet detector based on GaN epilayer grown on 6H-SiC substrate by metalorganic chemical vapor deposition have been investigated. We have obtained the detectable energy span of the device up to ultraviolet by photocurrent measurements. The spectral responsivity remains nearly constant for wavelength from 250nm to 365nm and drops by three orders of magnitude within 10nm of the band edge (by 380nm). The detector responsivity was measured as 133A/W at a wavelength of 360nm under a 5V bias, and the voltage-dependent responsivity was performed. We have also developed an easy method to determine the response time, and the relationship between the response time and the bias has obtained too.

PACC: 7240, 6855