

极化调控 AlGa_N 基日盲紫外雪崩光电二极管性能优化

董可秀 赵先峰 欧美英

滁州学院机械与电子工程学院, 安徽 滁州 239000

摘要 通过数值模拟研究了各层参数对极化调控的背入射异质结分离吸收倍增层型 AlGa_N 基雪崩光电二极管 (APDs) 性能的影响, 并详细分析相关物理机制。计算结果表明: 参数的优化有利于降低 APDs 的雪崩击穿电压, 提高倍增因子。特别是对于 P-GaN 层 AlGa_N 雪崩光电二极管, 倍增因子增加可超过 300%, 这是由于该雪崩光电二极管的 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 异质界面的强极化电荷调节了倍增层、中间插入层、吸收层的电场分布, 增加了载流子的注入和倍增效率, 同时还由于参数优化减小了倍增时的暗电流。

关键词 光学器件; 异质结雪崩光电二极管; 分离吸收倍增; 日盲; 极化场

中图分类号 TN364+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.062304

Improvements of Solar-Blind Ultraviolet AlGa_N Avalanche Photodiodes with the Polarization Effects

Dong Kexiu Zhao Xianfeng Ou Meiyong

School of Mechanical and Electronic Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China

Abstract Effects of the parameters of each layer on the performance of back-illuminated separate absorption and multiplication hetero-junction AlGa_N avalanche photodiodes (APDs) with the polarization effect are investigated numerically, and the detailed physical mechanisms are explained. The results show that the breakdown voltage for the APDs can lower significantly and the gain increases pronouncedly with the optimization of these parameters. The maximum gain for AlGa_N APDs with p-GaN layer has been improved more than 300%. This is because the polarization induced charge at the GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N hetero-interface controls the distribution of the electric field of multiplication, inserting and absorption layer, and enhances the efficiency of injection and multiplication of carriers. Meanwhile, the optimization of the parameters can decrease the dark current of APDs at breakdown voltage.

Key words optical devices; hetero-junction avalanche photodiode; separate absorption and multiplication; solar-blind; polarization field

OCIS codes 230.5160; 250.0250; 230.5170

1 引言

高 Al 组分 AlGa_N 基雪崩光电二极管 (APDs) 具有天然的日盲性能, 能够在强太阳辐射背景下探测到微弱的紫外信号, 近年来一直成为人们研究的热点。然而目前, 由于高内部增益 (大于 10^6) 和低暗电流, 光电倍增管一直占据着探测器的主要市场。但光电倍增管有着自身难以克服的缺陷: 体积大, 易碎, 成本高, 并且需要很高的工作电压。固态 AlGa_N 基 APDs 虽然能克服这些缺点, 可是, 要想取代光电倍增管成为探测器市场的主导, 还需继续提高其内部增益、探测灵敏度和降低器件噪声。

20 世纪 90 年代以来, GaN 基材料及可见光盲 APDs 的性能发展迅速^[1-4]。目前, 利用纯空穴离化的背入射分离吸收倍增型 (SAM) GaN APDs, 其内部增益已高达 10^5 ^[5-7]。但 AlGa_N 基日盲紫外 APDs 的性能远远落后 GaN 基 APDs。2010 年, Sun 等^[8]报道了峰值光谱响应在 270 nm 处的 AlGa_N 基日盲紫外 APDs, 其增益

收稿日期: 2013-12-21; 收到修改稿日期: 2014-01-18; 网络出版日期: 2014-05-15

作者简介: 董可秀 (1972—), 女, 博士, 讲师, 主要从事 III 族氮化物半导体材料与器件方面研究。

E-mail: kexiudong@126.com

为2500,这是目前世界上报道性能最好的AlGaIn APDs。高增益AlGaIn基日盲APDs研究进展缓慢的原因主要在于高Al组分的AlGaIn材料位错密度高,难以生长出高质量的AlGaIn材料,其次在于低的p型层掺杂效率。为了提高AlGaIn APDs的性能,大部分研究小组将工作的重点放在提高外延层的生长质量上^[9-11]。然而考虑到现有AlGaIn材料生长及加工工艺水平,恰当的器件结构设计也是提高AlGaIn APDs性能的一个重要途径。本课题组设计了低Al组分p型层异质结分离吸收倍增型AlGaIn APDs,利用极化场与外电场方向相同增加倍增层内总电场,提高雪崩增益。理论计算表明:在背入射条件下,相对于无极化的分离吸收倍增型AlGaIn APDs,器件的倍增因子有显著的提高^[12]。在文献[12]中各层参数的设计均参照无极化分离吸收倍增型AlGaIn APDs^[13]。其中参数对器件性能的影响还不十分清楚,因此,本文通过分析各层参数对器件击穿电压和倍增因子的影响优化器件结构设计,进一步提高器件性能。

2 结构和参数

利用半导体器件模拟软件Atlas详细分析各层参数(掺杂浓度,厚度,缺陷密度)对背入射异质结SAM型AlGaIn APDs的击穿电压和倍增因子的影响。其中所涉及的物理模型和材料参数均与文献[12]一致,金属与半导体的接触为欧姆接触。最初设计的AlGaIn APDs的结构如图1所示:在不掺杂的Al_{0.5}Ga_{0.5}N/AlN模版层上依次生长300 nm n型($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.5}Ga_{0.5}N层,180 nm Al_{0.4}Ga_{0.6}N吸收层,60 nm n型($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Al_{0.4}Ga_{0.6}N中间插入层,140 nm Al_{0.4}Ga_{0.6}N倍增层和80 nm p型($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) Al_xGa_{1-x}N层,其中Al组分分别为0、0.15和0.25,吸收层和倍增层的剩余载流子浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在计算参数对器件性能影响时,采用控制变量法,每次只改变一个参数而保证其他参数不变。

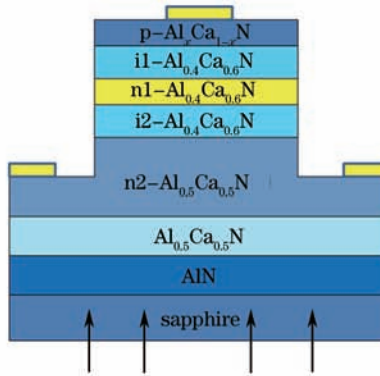


图1 背入射分离吸收倍增型AlGaIn APDs结构示意图

Fig.1 Schematic structure of back-illuminated SAM AlGaIn APDs

3 结果与讨论

p型层掺杂浓度及厚度对AlGaIn APDs的击穿电压和倍增因子的影响如图2所示。当考虑自由载流子屏蔽场时,APDs倍增层内的总电场可表示为^[14]

$$E_{\text{total}} = E_i + E_p + E_e + E_s, \quad (1)$$

式中 E_i 、 E_p 、 E_e 和 E_s 分别表示内建电场、极化场、外加反偏电压场和自由载流子屏蔽场。在反向大偏压条件下,自由载流子的屏蔽场(E_s)可忽略不计^[12],对于(AI)GaIn基的APDs,雪崩开始时的关键场(E_{total})约为常数 2.73 MV/cm ^[15],内建电场(E_i)的大小主要取决于n型或p型掺杂浓度。由于反偏电压场与内建电场和极化场方向相同,为满足关键场的要求,雪崩击穿电压随着p型层空穴浓度的增加(内建电场的增加)及p型层Al组分的减小(极化场增加)而降低。减小的击穿电压降低了雪崩倍增时的暗电流,导致APDs倍增因子的提高。同时,当反偏电压超过击穿电压继续上升时,界面极化电荷有助于提高倍增层内总离化场^[12,16],从而增加空穴的离化系数,提高APDs的雪崩增益。因此,如图2(a)所示,强极化调控p-GaN层AlGaIn APDs的倍增因子随空穴浓度的增加显著提高。由图2(b)可知,由于相同的p型掺杂浓度,APDs的击穿电压和倍增因子随p型层厚度的变化几乎维持不变。即使在p型层厚度低于50 nm时,器件也没出现由于p型层完全耗尽导致暗电流增加,器件性能下降的现象。

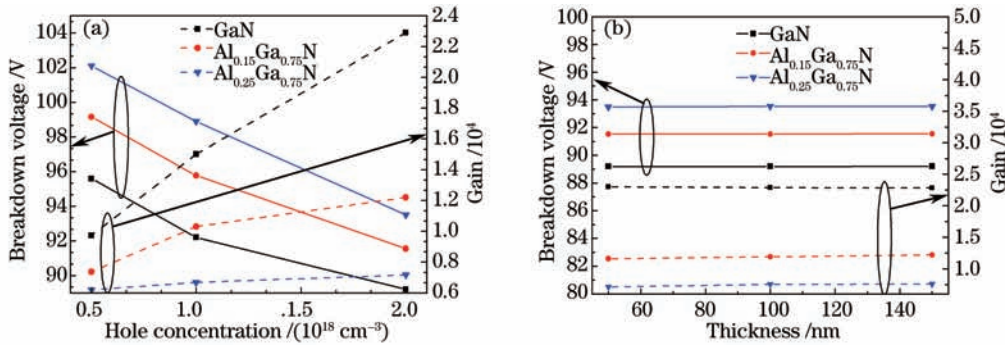


图2 击穿电压和倍增因子与(a)p型层空穴浓度和(b)p型层厚度的关系

Fig.2 Breakdown voltage and gain as a function of (a) hole concentration and (b) thickness of p-type layer

图3(a)为APDs击穿电压和倍增因子随中间插入层电子浓度的变化关系。如图所示,APDs的击穿电压随电子浓度的增加迅速下降。例如,对于p-GaN层AlGaN APDs来说,当电子浓度从 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,雪崩击穿电压从105 V下降到50 V,降低了约50%。相反,倍增因子与电子浓度的关系曲线呈现不一样的变化趋势:当电子浓度从 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,倍增因子从 1.19×10^4 持续上升至峰值 2.88×10^4 ,随着电子浓度继续增大,倍增因子没有表现出上升的趋势,反而迅速下降。为解释图3(a)中出现的现象,计算了最大增益电压点p-GaN层AlGaN APDs不同电子浓度下的电场分布[图3(b)]。图中电场的分布与无极化分离吸收倍增型APDs具有相似的变化规律^[17]。当电子浓度低于 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,随着电子浓度的增加,APDs倍增层内总离化场不断增加,从而导致倍增因子升高。并且,由于极化电荷对倍增层内总电场的调控,p-GaN层AlGaN APDs的倍增因子随电子浓度的增加上升更为明显。当电子浓度进一步增加到接近 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件由分离吸收倍增型结构退化成简单的p-i-n型结构。在p-i-n型结构中,电子空穴都参与初始离化,且电子离化系数小于空穴离化系数,因此,器件倍增因子下降,过量噪声增加,器件性能恶化。雪崩击穿电压、倍增因子和电场分布与插入层厚度的关系如图3(c)和3(d)所示,与曲线3(a)和3(b)呈现相似的变化规律。

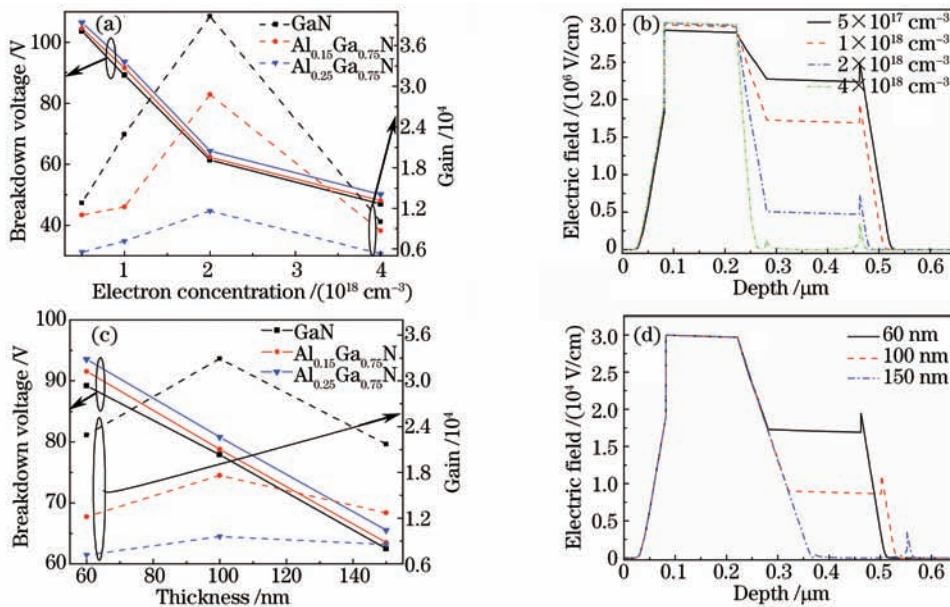


图3 不同n1层(a)电子浓度和(c)厚度下的击穿电压和倍增因子;不同n1层(b)电子浓度和(d)厚度下p-GaN层AlGaN APDs的电场分布

Fig.3 Breakdown voltage and gain as a function of (a) electron concentration and (c) thickness of n1-type; distribution of E-field for p-GaN AlGaN APDs correspondingly with (b) electron concentration and (d) thickness of n1-type

吸收层和倍增层的厚度对APDs性能的影响如图4所示:雪崩击穿电压随吸收层和倍增层厚度的增加线性增加,因为吸收层或倍增层越厚,则需要更高的击穿电压使倍增层内达到离化关键场。由图4(b)可知,

当吸收层厚度由 300 nm 减小到 100 nm 时, p-GaN 层 AlGa_N APDs 的倍增因子迅速增大, 增幅超过 300%。这是因为在 p-GaN/p-Al_{0.4}Ga_{0.6}N 异质界面强负极化电荷不仅提高了倍增层的离化场, 同时还增加了中间插入层和吸收层的电场, 极大地提高了空穴的注入效率和倍增效率, 吸收层越薄, 极化对电场的调控作用越强。倍增层厚度对器件倍增因子的影响较为复杂。通常情况下, 倍增层厚度增加将导致更大的载流子有效倍增长度, 产生更多的离化事件, 但是, 增加的倍增层厚度不一定会导致倍增因子的升高。因为离化系数依赖于倍增层电场, 反过来又制约着倍增层的厚度, 倍增层越薄, 离化电场越大。因此, 由图 4(a) 可知, 弱极化调控的 p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N APDs 倍增因子随倍增层厚度增加略有上升, 而强极化调控的 p-GaN 层 AlGa_N APDs 在倍增层厚度约 140 nm 处获得最优化的倍增因子。

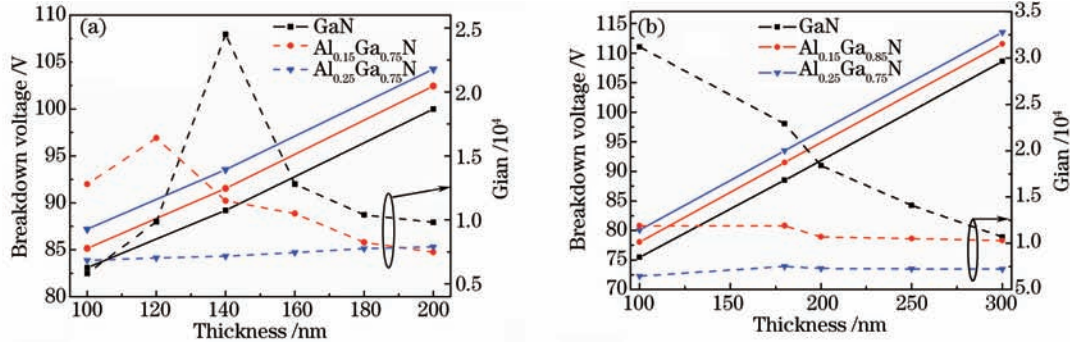


图 4 击穿电压和倍增因子与(a)i1层厚度和(b)i2层厚度的关系曲线

Fig.4 Breakdown voltage and gain as a function of the width of (a) i1-layer and (b) i2-layer

图 5 为 p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N APDs 击穿电压、倍增因子和体缺陷浓度关系曲线。缺陷浓度变化范围从 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 至 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ [18-20]。当缺陷浓度从 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 时, 击穿电压和倍增因子接近常数 93.54 V 和 9445。而当缺陷浓度从 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 击穿电压从 93.54 V 升高到 99.70 V, 倍增因子从 9445 下降到 317, 下降了约 97%。同时, 还计算了不同的缺陷浓度分布对器件性能的影响, 如表 1 所示: 当高缺陷浓度仅分布在 p 型或 n 型层时, 倍增因子下降不明显。高缺陷浓度分布在吸收层导致最低的倍增因子和最高的击穿电压, 这可能是因为光生电子空穴对在吸收层被大量的缺陷复合, 从而导致只有少量的空穴能通过中间插入层注入到倍增层参予离化。当高缺陷浓度分布在倍增层时, 由于缺陷的散射作用, 降低了离化载流子的动能, 减小了载流子有效碰撞离化系数, 因此, 器件也表现出较低的增益。

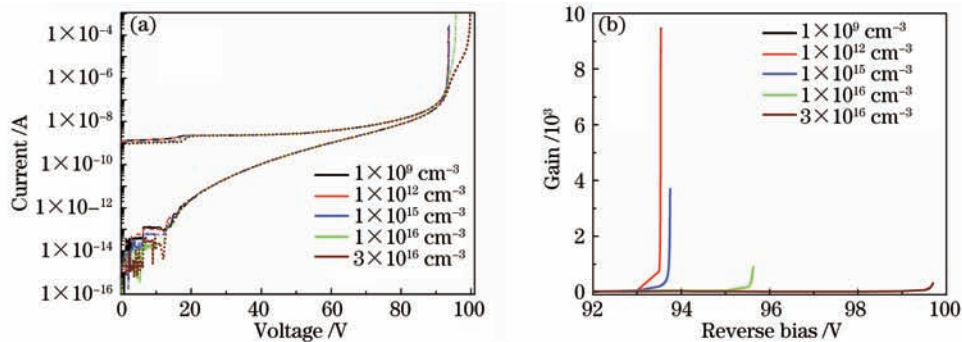


图 5 不同缺陷浓度下 p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N APDs (a) 反向暗电流和 275 nm 光照下的光电流电压曲线和 (b) 倍增因子大小

Fig.5 (a) Reverse I - V characteristics in darkness and under illumination at 275 nm and (b) gain for the AlGa_N APDs with p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N layers under different trap densities

4 结 论

分析了各层参数(浓度、厚度、缺陷密度及分布)对背入射异质结分离吸收倍增型 AlGa_N 基日盲紫外 APDs 的击穿电压和倍增因子的影响。结果表明: 适当选择 p 型层和中间插入层的载流子浓度将降低雪崩击穿电压, 提高倍增因子, 特别是对强极化调控的 p-GaN 层 AlGa_N APDs, 倍增因子增幅更为显著。并且由于极化电荷对倍增层和吸收层电场分布的影响, 使得强极化调控的 p-GaN 层 AlGa_N APDs 和弱极化调控的 p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N APDs 的倍增因子随吸收层和倍增层厚度的变化呈现出不一样的变化规律。同时研究结果还表

明:高缺陷浓度分布在吸收层或倍增层最容易恶化器件性能。

表1 不同缺陷浓度分布下 p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N APDs 的击穿电压和倍增因子

Table 1 Avalanche breakdown voltage and maximum multiplication gain for APDs with p-Al_{0.25}Ga_{0.75}N layer with different distributions of defect density

p1/cm ⁻³	i1/cm ⁻³	n1/cm ⁻³	i2/cm ⁻³	n2/cm ⁻³	Voltage /V	Gain
3×10 ¹⁶	1×10 ¹²	1×10 ¹²	1×10 ¹²	1×10 ¹²	94.6	5.84×10 ³
1×10 ¹²	3×10 ¹⁶	1×10 ¹²	1×10 ¹²	1×10 ¹²	96.6	1.08×10 ³
1×10 ¹²	1×10 ¹²	3×10 ¹⁶	1×10 ¹²	1×10 ¹²	94.7	1.10×10 ³
1×10 ¹²	1×10 ¹²	1×10 ¹²	3×10 ¹⁶	1×10 ¹²	95.1	8.71×10 ²
1×10 ¹²	1×10 ¹²	1×10 ¹²	1×10 ¹²	3×10 ¹⁶	93.6	5.28×10 ³

参考文献

- Zhou Maiyu, Zhou Lei, Zheng Nan, *et al.*. Investigation on properties of p-i-n structured GaN photodetectors[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0117001.
周脉鱼, 周 蕾, 郑 南, 等. p-i-n 结构 GaN 光电探测器性能的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0117001.
- Zhao Man, Li Jian, Wang Xiaojuan, *et al.*. The properties of GaN Schottky photodetectors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3409-3412.
赵 曼, 李 健, 王晓娟, 等. 肖特基型氮化镓紫外光电探测器性能[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3409-3412.
- Lian Ruikai, Li Lin, Fan Yaming, *et al.*. Effects of AlN buffer layer thickness and Al pre-treatment on properties of GaN/si(111) epilayer[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0106001.
廉瑞凯, 李 林, 范亚明, 等. 预辅 Al 及 AlN 缓冲层厚度对 GaN/Si (1 1 1) 材料特性的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0106001.
- Tang Jianjun, Liang Ting, Xiong Jijun, *et al.*. Analysis of stress testing using raman spectra on heteroepitaxy Si/GaN[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(8): 083002.
唐建军, 梁 庭, 熊继军, 等. 异质外延 Si/GaN 应力状态的拉曼光谱测试分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(8): 083002.
- J C Carrano, D J H Lambert, C J Eiting, *et al.*. GaN avalanche photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 2000, 76(7): 924-926.
- J B Limb, D Yoo, J H Ryou, *et al.*. GaN ultraviolet avalanche photodiodes with optical gain greater than 1000 grown on GaN substrates by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(1): 011112.
- J L Pau, R McClintock, K Minder, *et al.*. Geiger-mode operation of back-illuminated GaN avalanche photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(4): 041104.
- L Sun, J L Chen, J F Li, *et al.*. AlGaIn solar-blind avalanche photodiodes with high multiplication gain[J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(19): 191103.
- C Bayram, J L Pau, R McClintock, *et al.*. High quantum efficiency back-illuminated GaN avalanche photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(21): 211107.
- T M Al tahtamouni, A Sedhain, J Y Lin, *et al.*. Si-doped high Al-content AlGaIn epilayers with improved quality and conductivity using indium as a surfactant[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(9): 092105.
- Chen Xiang, Xing Yanhui, Han Jun, *et al.*. Influence of AlN interfacial layer on electrical properties of AlGaIn/AlN/GaN HEMT material grown by MOCVD[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0606005.
陈 翔, 邢艳辉, 韩 军, 等. AlN 隔离层对 MOCVD 制备的 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 材料电学性质的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0606005.
- K X Dong, D J Chen, H Lu, *et al.*. Exploitation of polarization in back-illuminated AlGaIn avalanche photodiodes [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2013, 25(15): 1510-1513.
- Y Huang, D J Chen, H Lu, *et al.*. Back-illuminated separate absorption and multiplication AlGaIn solar-blind avalanche photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(25): 253516.
- K X Dong, D J Chen, B Liu, *et al.*. Characteristics of polarization-doped N-face III-nitride light-emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(7): 073507.
- R McClintock, J L Pau, K Minder, *et al.*. Hole-initiated multiplication in back-illuminated GaN avalanche photodiodes [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90 (14): 141112.

- 16 A V Sampath, Q G Zhou, R W Enck, *et al.*. P-type interface charge control layers for enabling GaN/SiC separate absorption and multiplication avalanche photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(9): 093506.
- 17 Wu Liangliang, Zhao Degang, Deng Yi, *et al.*. Distribution of electric field and design of devices in GaN avalanche photodiodes[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(4): 619-624.
- 18 Xiaodong Wang, Weida Hu, Xiao Shuang, *et al.*. Dependence of dark current and photoresponse characteristics on polarization charge density for GaN-based avalanche photodiodes[J]. J Phys D: Appl Phys, 2011, 44(40): 405102.
- 19 F Xie, H Lu, D J Chen, *et al.*. Metal - semiconductor - metal ultraviolet avalanche photodiodes fabricated on bulk GaN substrate[J]. IEEE Electron Dev Lett, 2011, 32(9): 1260-1262.
- 20 H Jiang, T Egawa. High quality AlGaIn solar-blind Schottky photodiodes fabricated on AlN/sapphire template[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(12): 121121.