

10 kV 垂直双扩散绝缘栅型光电导开关结构设计

王馨梅^{1*}, 王慧慧², 张丽妮², 段鹏冲², 贾婉丽²

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²西安理工大学理学院, 陕西 西安 710048

摘要 漏电流问题限制了传统半绝缘氮化镓光电导开关的高压应用。提出在半绝缘 GaN:Fe 衬底(激光触发区)上增加 n 型外延层并在其中构造垂直双扩散场效应晶体管元胞阵列(电触发区),即在传统纵向光电导开关结构上引入了一个由栅压控制的反向 pn 结,利用空间电荷区对载流子的耗尽作用降低半绝缘材料的漏电流。器件建模仿真显示,电、光触发区能合理分担 10 kV 外加偏置电压,在相同的电场偏置强度下,器件的漏电流低于传统光电导开关两个数量级,而且在绝缘栅开通过程中电触发区偏压能快速转移到光触发区,使光触发区在更高的动态偏置电场下被激光脉冲触发,提高了激光能量利用率。此外,计算分析了激光参数与器件输出特性之间的关系,以进一步提高激光利用率。

关键词 光电子学; 脉冲激光; 光电导开关; 激光能量利用率; 氮化镓; 漏电流

中图分类号 O439; TN20

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.192501

Design of 10-kV Vertical Double-Diffused Insulated-Gate Photoconductive Semiconductor Switch

Wang Xinmei^{1*}, Wang Huihui², Zhang Lini², Duan Pengchong², Jia Wanli²

¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²Faculty of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The problem of leakage current limits the application of traditional semi-insulated gallium nitride (GaN) photoconductive semiconductor switches (PCSSs) in high-voltage applications. Therefore, a n-type epitaxial layer is grown on the semi-insulated GaN:Fe substrate (as a laser-triggered region), in which a cell array of vertical double-diffusion-field-effect transistors (as a voltage-triggered region) is constructed. In other words, a reverse pn junction controlled by the gate voltage is introduced into the traditional vertical PCSS structure for restraining the leakage current of the semi-insulated GaN due to the carrier depletion effect of the pn-junction space-charge region. The device simulation results show that the 10-kV bias voltage is reasonably shared by the laser- and voltage-triggered regions and the leakage current of the device is two orders of magnitude less than that of the traditional PCSS with the same bias electric field. Moreover, the results show that the bias voltage of the voltage-triggered region can be transferred to the laser-triggered region quickly with the gate opening; thus, the laser energy efficiency is heightened because the dynamic bias electric field increment across the laser-triggered region brings a high photocurrent peak. Moreover, the relationships between the laser parameters and the device output characteristics are calculated and analyzed to ensure high laser energy efficiency.

Key words optoelectronics; pulsed laser; photoconductive semiconductor switch; laser energy efficiency; gallium nitride; leakage current

OCIS codes 250.6715; 250.0040; 040.5250; 130.0250

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61575158)

* E-mail: wangxinmei@xaut.edu.cn

1 引言

光电导开关(PCSS)是本征或半绝缘(SI)的晶体材料和超快脉冲功率激光技术相结合的产物,在超宽带脉冲功率技术和超快电子学等众多领域具有广阔的应用前景^[1-5]。PCSS的自然关断时间主要由载流子寿命决定,因此采用直接带隙半导体材料(如GaAs、GaN等)制作的PCSS天然具有超快关断能力,可实现高重复频率短脉冲输出。与第二代半导体材料相比,第三代半导体材料GaN在禁带宽度、电子饱和漂移速度^[6]和热导率等关键指标上均更为出色。

受晶体生长工艺所限,目前任何非特意掺杂生长的GaN晶体均为n型^[7]。因此,文献报道的GaN PCSS都是基于GaN:Fe晶圆制作的,即基于铁掺杂补偿的氢化物气相外延(HVPE)法^[8-9]在蓝宝石衬底上经Al₂O₃/AlN/GaN晶格过渡后生长制备的半绝缘自支撑片。在基于PCSS技术的脉冲功率系统中,系统造价、便携性、稳定性、维护成本几乎完全是由激光器决定的。纯净的本征GaN只能由昂贵笨重的紫外激光器触发,而具有大量Fe_{Ga}³⁺和Fe_{Ga}²⁺深受主能级^[8-10]的半绝缘GaN:Fe能够基于双光子吸收效应被光子能量大于2.12 eV(对应585 nm可见光)的常规激光器有效触发^[10],因此,第三代GaN:Fe PCSS与当前第二代GaAs PCSS一样具有良好的商业化开发前景。

传统纵向型PCSS由衬底及其上下两面的欧姆电极构成^[11],暗态漏电流遵循欧姆定律随外加偏置电压的增大而增大。GaAs的禁带宽度为1.4 eV,故其本征击穿场强应为400 kV/cm左右,当前半绝缘GaAs衬底击穿强度可达到20 kV/cm量级;GaN的禁带宽度为3.4 eV,故其本征击穿场强约为3 MV/cm,但是受生长工艺水平所限,当前半绝缘GaN衬底击穿强度仅为100 kV/cm量级^[11],远远小于其理想耐压(3 MV/cm)。因此必须重视传统PCSS半绝缘层遵循欧姆定律增大的漏电流问题,引入反偏pn结空间电荷区,才能使GaN宽禁带发挥高耐压的潜力。PIN结构^[12]利用空间电荷区抑制漏电流,但是存在结电容和漂移死区,不满足超快通断的需求。受PIN结构的启发,2015年,Wang等^[13]首次提出绝缘栅型PCSS的基本概念。文献^[13]给出了一个外延三层制作垂直U沟槽绝缘栅的800 V GaN PCSS设计,但是该结构通流能力受深刻蚀U槽壁强散射的限制,而且该文献缺少对绝

缘栅型PCSS漏电流抑制机理的阐释,以及缺少激光参数优化设计。

本文以半绝缘GaN:Fe为衬底,在其n⁻型外延层上构造垂直双扩散(VD)场效应晶体管(MISFET)结构^[14]的元胞阵列,从而引入一个由绝缘栅控制的反向pn结来抑制漏电流,命名该结构为垂直双扩散绝缘栅型光电导开关(简称VDIG-PCSS)。本文将对其漏电流抑制机理、耐10 kV高压设计以及激光参数优化设计进行深入讨论。

2 结构与工作原理

VDIG-PCSS结构及其等效电路模型如图1所示。首先在厚度为 w 的半绝缘衬底上外延低浓度施主掺杂的n⁻层,然后在该外延层上局部受主掺杂分别形成低浓度p⁻区和高浓度p⁺区,再在p⁻区和p⁺区内局部高浓度施主掺杂形成n⁺区,最后制作绝缘层和电极,形成绝缘栅控pn结元胞阵列。按触发导通方式将器件内部分为栅极电压触发区和脉冲激光触发区,静态时(即在每个周期内光、电触发信号均未到来时),光、电触发区共同分担外加偏置电压 U_s 。动态触发时,对触发信号时序的基本要求如下:单脉冲能量为 E_L 的激光到来之前,电触发区已经由栅压信号 V_G 控制完全开通(其导通压降与半绝缘层相比可完全忽略不计),使外加偏置电压完全降在光触发区上。

反偏pn结的空间电荷区分布规律如图2所示,定义空间电荷区扩展至电触发区-光触发区交界面时所需施加的偏置电压为 V_{th} ,将其称之为电触发区穿通电压。商品化的半绝缘GaN:Fe晶圆都是极弱的n型,这是因为非掺GaN都是n型的,如果过补偿就会大大降低载流子迁移率等性能。因此,外加偏置电压 U_s 只需略大于 V_{th} ,pn结就会迅速耗尽光触发区内的多余电子,使空间电荷区立刻扩展至整个光触发区,并截止至阳极处的n⁺层中。静态时电触发区所能分担的最大偏置电压值约等于 V_{th} ,故可借助一个理想稳压二极管模型来表征电触发区的分压特性。如图1(b)所示,将VDIG-PCSS等效为一个n沟道增强型MISFET功率开关元件并联一个阈值为 V_{th} 的稳压二极管元件,再与一个压控且光控的非线性电阻元件 R 串联。

静态时,当外加偏置电压 U_s 小于等于 V_{th} 时,空间电荷区没有扩展到光触发区,光触发区的静态分压为零,此时该非线性电阻的阻值为常数(主要由半绝缘衬底的材料电阻率决定),器件漏电流为零;

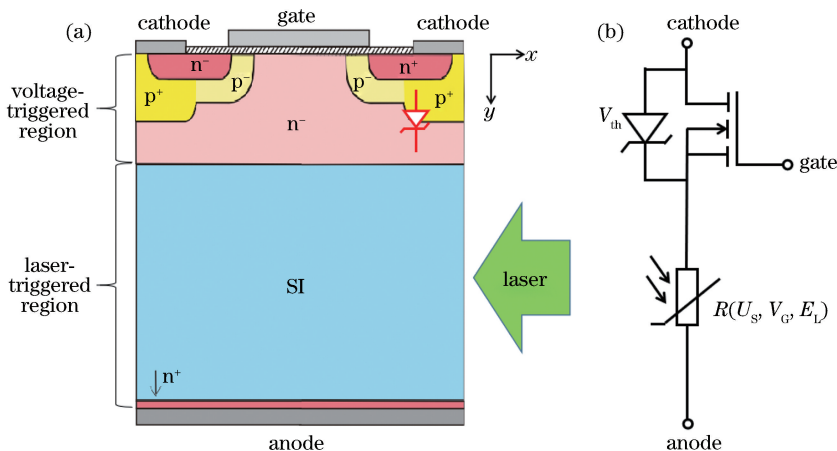


图1 VDIG-PCSS 结构与等效电路模型。(a) 一个元胞结构;(b) 等效电路

Fig. 1 Device structure and equivalent circuit model of VDIG-PCSS. (a) Structure of one cell; (b) equivalent circuit

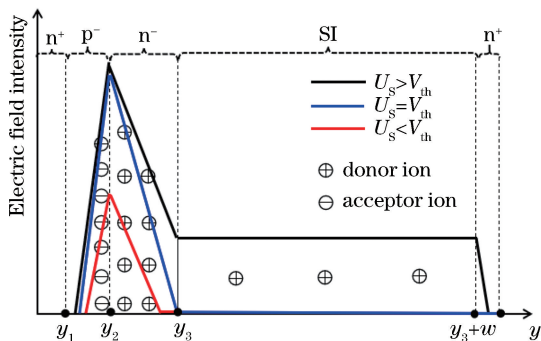


图2 VDIG-PCSS 静态时空间电荷区分布示意图

Fig. 2 Schematic of space-charge region distribution of VDIG-PCSS in static state

当 U_s 大于 V_{th} 时,光触发区静态分压为 $(U_s - V_{th})$, 此时器件漏电流为空间电荷区反向饱和漏电流 J , 其理论公式^[15]为

$$J = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p}, \quad (1)$$

式中: D_n 、 D_p 分别为电子和空穴扩散系数; n_{p0} 为 p 区平衡电子浓度; p_{n0} 为 n 区平衡空穴浓度; L_n 、 L_p 分别为电子和空穴扩散长度; q 为电子电量。由此可知 VDIG-PCSS 的静态漏电流是温度敏感的, 但与外加偏置电压大小无关, 因此高压偏置下其静态漏电流可远小于传统 PCSS 的暗态漏电流。

动态时,在栅压作用下形成的导电沟道破坏了 pn 结,从而使空间电荷区消失,器件处于预开通状态,此时光触发区的分压升为 U_s , 其电阻值由半绝缘衬底电阻率和元胞阵列通流面积决定。由冲击耐压实验经验可知,在短时间内 ($\mu s \sim ns$ 量级) GaN 材料可承受高于该材料直流击穿电场 1~8 倍的电压, 虽然此时漏电流较大,但是光触发区可以在高压甚至是过压下接受 $fs \sim ns$ 量级的短脉冲功率激光触

发开通,并且光生载流子能在 $ps \sim ns$ 量级时间内因电极吸收和相互复合而消耗殆尽,使器件实现自行关断。如果拟使用波长较短的触发光,因其吸收深度浅,建议通过阳极电极所在的平面进行垂直入射,需要将阳极设计为镂空或透明电极;如果拟使用波长较长的触发光,因其吸收深度深(例如 GaN : Fe 的 532 nm 吸收深度约 $2 \text{ cm}^{[11]}$),为了保证激光能量不因透射而大量损失,需要在器件侧面制作一个或多个光窗,并引导激光通过光窗水平入射。

本文之所以采用 MISFET 阵列结构控制 pn 结空间电荷区的产生与消失,主要是考虑到 MISFET 的元胞电流是负温度系数的,即阵列内自动均流,能满足大电流需求。在众多 MISFET 结构中,本文选择了垂直双扩散结构,因为它采用的是平面工艺,不需要刻蚀深槽,可克服横向双扩散(LD)结构 MISFET 耐压低和垂直沟道 U 形槽(VU)结构 MISFET 沟道迁移率低的缺点。VDIG-PCSS 最大静态耐压主要由终端决定,因此本文使用横向变掺杂技术构成缓变结来提升终端击穿特性^[16-17]。制约 VDIG-PCSS 发展的工艺难点是以 Mg 为典型代表的 GaN 浅受主杂质激活率低,且 GaN 在高温下易分解的特点使得离子注入后所必需的热退火恢复晶格损伤工艺的技术难度较高^[18]。这些也是当前制约整个 GaN 器件产业的重要原因。值得指出的是,随着基于脉冲功率激光实现局部快退火技术^[18-19]的发展,有望突破上述 GaN 器件工艺瓶颈。

3 仿真分析与讨论

3.1 可行性论证

为了证明器件结构的有益性,如图3所示,创建

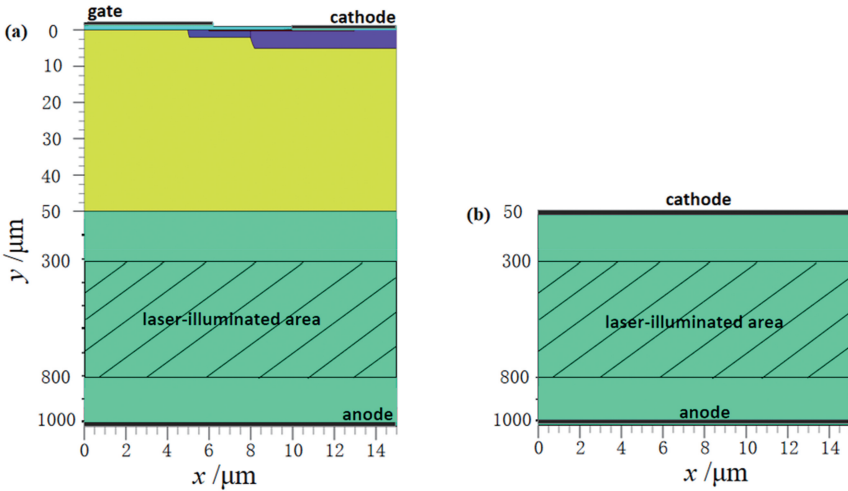


图3 VDIG-PCSS与传统PCSS的仿真模型。(a) VDIG型;(b)传统型

Fig. 3 Simulation models of VDIG-PCSS and traditional PCSS. (a) VDIG type; (b) traditional type

了一个耐压 10 kV 的 VDIG-PCSS 及一个具有相同衬底的传统纵向型结构 PCSS 模型仿真, 参数见表 1。考虑到器件的宽禁带、高场、n 沟道导电、光导等特点, 仿真中特别应用了 GaN 温度依赖禁带宽度模型、高场迁移率模型、碰撞电离模型、反型层迁移率模型、光生载流子产生模型等物理模型^[20]。其中光生载流子产生模型中所需的双光子吸收消光系数 k 曲线, 是本课题组根据美国 Kyma 公司(大尺寸自支撑 GaN:Fe 晶圆生产商之一)GaN:Fe 衬底对激光(光能 2 mJ、波长 430~530 nm、脉宽 5 ns)吸收系数实测数据拟合所得^[10]。

表 1 器件仿真参数

Table 1 Parameters for device simulation

Region	Doping concentration/cm ⁻³	Depth/ μm
n ⁺	1×10 ¹⁸	0.3(y ₁)
p ⁻	2×10 ¹⁶	2
p ⁺	1×10 ¹⁷	5(y ₂)
n ⁻	1×10 ¹⁵	50(y ₃)
SI	1×10 ⁷	950

分别在 U_s 为 1, 2.5, 5 kV 偏置条件下计算 VDIG-PCSS 模型光、电触发区之间的静态分压情况。电势在 y 方向上的分布如图 4 所示, 从曲线拐点分析可知该器件的 V_{th} 约为 2.3 kV。VDIG-PCSS 与传统 PCSS 的伏安特性曲线对比如图 5 所示, 分析可知 VDIG-PCSS 的击穿电压约为 10.1 kV, 且 VDIG-PCSS 的静态漏电流在击穿前基本保持不变, 而传统 PCSS 近似一个线性电阻, 其漏电流遵循欧姆定律随偏压的增大而增大。

给 VDIG-PCSS 模型施加 10 kV 偏置电压, 因

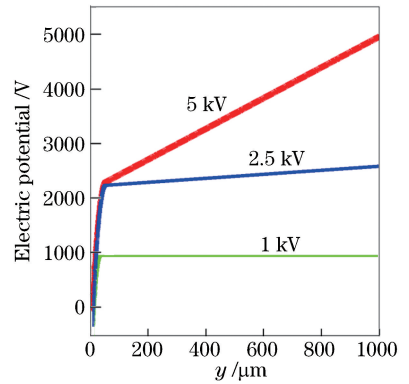


图 4 VDIG-PCSS 在不同偏压条件下的电势分布

Fig. 4 Electric potential distribution of VDIG-PCSS at various bias voltages

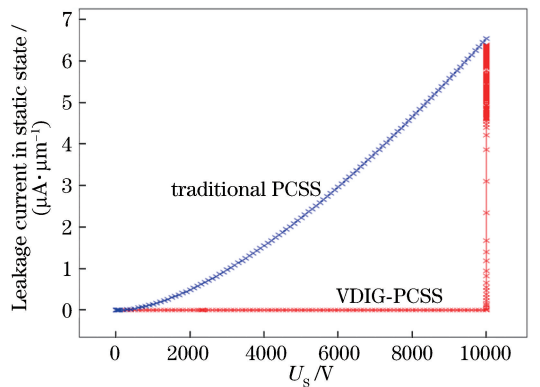


图 5 VDIG-PCSS 与传统 PCSS 的伏安特性曲线对比

Fig. 5 Comparison of volt-ampere characteristic curves of VDIG-PCSS and traditional PCSS

为 V_{th} 为 2.3 kV, 所以光触发区偏置电场为 $(10-2.3) \text{ kV} \div 950 \mu\text{m} = 81.05 \text{ kV/cm}$, 仿真可知其静态漏电流密度为 $1.70 \times 10^{-9} \text{ A}/\mu\text{m}$, 静态电场分布如图 6 所示, 与图 2 理论推导结果基本一致。为了观察和对比, 给相同衬底制造的传统纵向

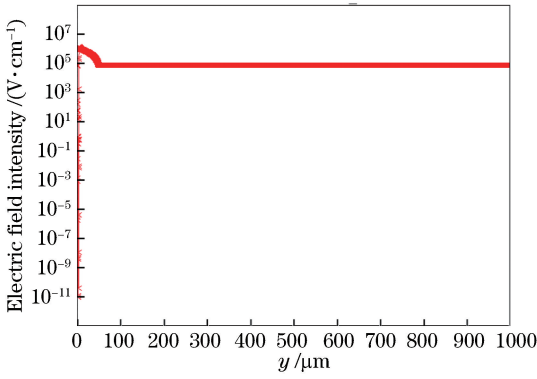


图6 偏置电压为 10 kV 时 VDIG-PCSS 静态电场分布(在 $x=10 \mu\text{m}$ 处取值)

Fig. 6 Electric field distribution of VDIG-PCSS in static state when bias voltage is 10 kV (cutline at $x=10 \mu\text{m}$)

PCSS 施加 7.7 kV 电压,且使其光触发区偏置电场强度也为 81.05 kV/cm ,仿真可知其暗态漏电流密度为 $4.22 \times 10^{-6} \text{ A}/\mu\text{m}$,高于 VDIG-PCSS 两个数量级以上。

在上述偏压条件下,用波长为 532 nm 的高斯脉冲激光分别触发两个器件,电、光触发信号的波形如图 7 所示,器件输出光电流脉冲波形如图 8 所示。随着 n 型导电沟道的生成,空间电荷区(载流子耗尽区)消失,10 kV 偏置下的 VDIG-PCSS 电触发区分压由 2.3 kV 下降至 2.1 V,光触发区分压从 7.7 kV 升至 10 kV,即光触发区的偏置电场从静态时的 81 kV/cm 升至动态时的 105.3 kV/cm 。这种电压动态转移机制提高了光触发区的瞬态偏置电场值,从而提升了光生载流子在电场中的漂移速度且减少了复合损耗,最终表现为相同光照下,VDIG-PCSS 的光电流峰值高于具有相同衬底和相同静态偏置电场值的传统 PCSS。

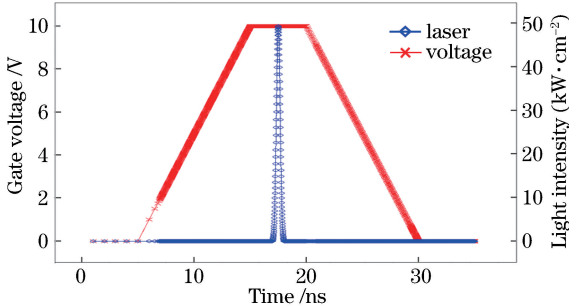


图7 VDIG-PCSS 的电、光触发脉冲波形图

Fig. 7 Pulse waveforms of gate voltage and laser for triggering VDIG-PCSS

如前所述,激光器决定了整个光电导功率开关系统的成本、便携性、稳定性、维护成本等多方面指标。与传统 PCSS 脉冲功率系统相比,VDIG-PCSS

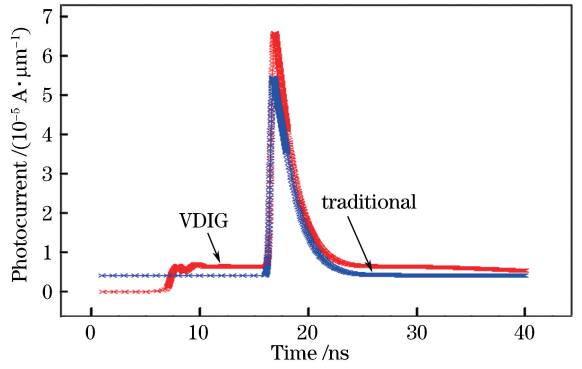


图8 VDIG-PCSS 与传统 PCSS 瞬态输出特性对比

Fig. 8 Comparison of transient output characteristics of VDIG-PCSS and traditional PCSS

结构具有更高的光能利用率,这意味着 VDIG-PCSS 脉冲功率系统可以降低对激光器单脉冲功率的要求。以钇铝石榴石(YAG)激光器^[21]的当前技术水平与成本为例进行讨论,假设单脉冲光能需求从大于 3 mJ 降至小于等于 2 mJ,则不仅 YAG 晶体的水冷方案可选择更便宜、便携且易维护的风冷方案,而且电光调 Q 方案也不再是必须的,可用更便宜且重复频率更高的声光调 Q 方案替代。

3.2 激光参数优化

为进一步提高光能利用率,在上述 VDIG-PCSS 模型基础上讨论激光单脉冲能量不变但光束直径可变的情况,以寻找最优光束直径。设光束从器件侧面水平入射,光强为均匀或超高斯分布(可视作均匀光),且其发散角相对于器件 2 cm 量级宽度而言可忽略不计^[22]。

设置激光束从器件侧面 $y=500 \mu\text{m}$ 处水平入射,光束直径和光功率密度同步改变以保持单脉冲光能不变。当偏置电压为 10 kV 时,仿真结果如图 9 所示,随着光束的展宽,器件的光电流脉冲峰值变高,上

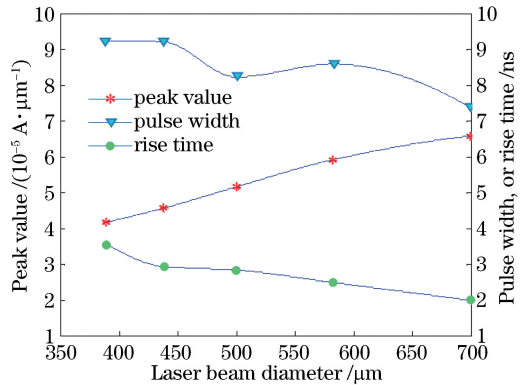


图9 触发光直径对 VDIG-PCSS 光电流波形的影响

Fig. 9 Influences of laser beam diameter on photocurrent waveform of VDIG-PCSS

升时间变短。脉宽随着光束展宽呈减小趋势,但不是单调递减,说明光照引起的空间电荷区屏蔽效应^[23]对光电流脉宽有一定影响。综上可知,在光源不变的情况下,光束直径越大,光能利用率就越高,且波形的上升时间变短。在实际工程中,如果光束直径相对于半绝缘层厚度过小,应考虑加装扩束镜。

4 结 论

本文提出了一种垂直双扩散绝缘栅型光电导开关结构,并基于 GaN:Fe 衬底材料特性设计了耐压 10 kV 的器件模型,证明了该结构的漏电流主要由反向 pn 结饱和漏电流决定,与偏压无关,因此其高压漏电流远远小于传统纵向型光电导开关结构,并且在栅压作用下电触发区分担的静态电压会动态转移给光触发区,提高了光生载流子的漂移速度和被电极吸收的概率,即提高了激光光能利用率。最后,为了进一步提高光能利用率以提升该脉冲功率系统的性价比,对触发光直径进行了优化设计。

参 考 文 献

- [1] Shi W, Fu Z L. 2-kV and 1.5-kA semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch [J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(1): 93-95.
- [2] Kirawanich P, Yakura S J, Islam N E. Study of high-power wideband terahertz-pulse generation using integrated high-speed photoconductive semiconductor switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1): 219-228.
- [3] Glover S F, Zutavern F J, Swalby M E, *et al.* Pulsed- and DC-charged PCSS-based trigger generators [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(10): 2701-2707.
- [4] Zhu S L, Zhao W, Liu B Y, *et al.* Cavity dumped laser using fast GaAs photoconductive switch [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0502003. 朱少岚, 赵卫, 刘百玉, 等. 利用高速 GaAs 光电导开关实现腔倒空激光脉冲输出 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502003.
- [5] Shi W, Wang S Q, Ma C, *et al.* Generation of an ultra-short electrical pulse with width shorter than the excitation laser [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 27577.
- [6] Chen S Y, Wang G. High-field properties of carrier transport in bulk wurtzite GaN: a Monte Carlo perspective [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(2): 023703.
- [7] Ehrentraut D, Meissner E, Bockowski M. Technology of gallium nitride crystal growth [M]. Berlin: Springer, 2010: 56-59.
- [8] Polyakov A Y, Smirnov N B, Govorkov A V, *et al.* Properties of Fe-doped, thick, freestanding GaN crystals grown by hydride vapor phase epitaxy [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2007, 25(3): 686-690.
- [9] Dumcenco D O, Levchenko S, Huang Y S, *et al.* Characterization of freestanding semi-insulating Fe-doped GaN by photoluminescence and electromodulation spectroscopy [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(12): 123508.
- [10] Wang X M, Mazumder S K, Shi W. Saturability algorithm of a sub-bandgap laser for triggering a photoconductive switch [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2017, 5(5): 395-399.
- [11] Leach J H, Metzger R, Preble E A, *et al.* High voltage bulk GaN-based photoconductive switches for pulsed power applications [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8625: 86251Z.
- [12] Zhou M Y, Zhou L, Zheng N, *et al.* Investigation on properties of p-i-n structured GaN photodetectors [J]. Chinese Journal of 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.
- [13] Wang X M, Mazumder S K, Shi W. A GaN-based insulated-gate photoconductive semiconductor switch for ultrashort high-power electric pulses [J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(5): 493-495.
- [14] He Y J, Lü H L, Tang X Y, *et al.* Experimental study on the 4H-SiC-based VDMOSFETs with lightly doped P-well field-limiting rings termination [J]. Solid-State Electronics, 2017, 129: 175-181.
- [15] Liu E K. Semiconductor physics [M]. 7th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 168-169. 刘恩科. 半导体物理学 [M]. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 168-169.
- [16] Zhao S Z, Li L, Zhao W K. Contrast research of VDMOS junction terminal technology [J]. Semiconductor Technology, 2016, 41(1): 46-50. 赵圣哲, 李理, 赵文魁. VDMOS 结终端技术对比研究 [J]. 半导体技术, 2016, 41(1): 46-50.
- [17] Taguchi S, Hasegawa K, Nomoto K, *et al.* High threshold voltage normally-off GaN MISFETs using self-alignment technique [J]. Physica Status Solidi

- (c), 2012, 9(3/4): 858-860.
- [18] Pearton S J, Abernathy C R, Ren F. Gallium nitride processing for electronics, sensors and spintronics [M]. London: Springer, 2006.
- [19] Skorupa W, Schmidt H. Subsecond annealing of advanced materials[M]. Cham: Springer, 2014.
- [20] Atlas user's manual[OL]. 2016-08-30 [2019-03-25]. http://www.eng.buffalo.edu/~wie/silvaco/atlas_user_manual.pdf.
- [21] Yi J Y, Tu B, Cao H X, *et al.* Design and experiment on high-power direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201004.
易家玉, 涂波, 曹海霞, 等. 高功率直接液冷固体薄片激光器的设计与实验[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201004.
- [22] Yang Y, Wu R, Sun M Y, *et al.* Collimation optical system with light field coupling of high-power lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0805001.
杨野, 邬融, 孙明营, 等. 高功率激光光场耦合的准直光学系统[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0805001.
- [23] Jia W L, Ji W L, Shi W. Two-dimensional Monte Carlo simulation of screening of the bias field in terahertz generation from semi-insulated GaAs photoconductors[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2042-2046.
贾婉丽, 纪卫莉, 施卫. 半绝缘 GaAs 光电导开关产生太赫兹波电场屏蔽效应的二维 Monte Carlo 模拟[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2042-2046.