

different parasitic parameters on the dynamic and static current imbalance at the load voltage of 600V is analyzed. Finally, a method based on impedance balance combined with core inductance is designed to suppress the dynamic and static current imbalance of parallel SiC MOSFET, which can effectively inhibit the current imbalance.

Key words parasitic inductance; parasitic capacitance; parallel SiC MOSFET; current imbalance

0 引言

随着电动汽车、新能源行业等新兴工业领域的发展,电力电子设备的应用领域也越来越广泛。作为功率开关器件的 MOSFET 和 IGBT 更引起研究人员的注意。传统的硅基器件在耐压、工作频率等方面都已经达到其物理极限,远不能满足日益提升的要求^[1],而作为宽禁带半导体代表的 SiC、GaAs 在高温、高压、高频环境下具有较高的热导率和较低损耗等优良的物理特性^[2,3]。因此, SiC MOSFET 在新能源汽车,大功率交流设备中逐步替代传统半导体器件^[4]。SiC MOSFET 制造,封装工艺相较于传统 MOSFET 并不成熟,晶圆尺寸和生长速度也远小于硅。在相同电压等级下,电流耐受程度越高,其制造、使用、后期维护的成本也越高。即使是相同型号的芯片,参数也会有一定的差异性,更大的电流和更高的开关速度下使得寄生参数在开关过程中对并联电流不平衡的影响更明显。如今,对于 SiC MOSFET 的研究主要集中于器件封装^[5],器件模型的建立^[6]以及大规模应用等重要领域^[7],而寄生参数对并联电流不平衡影响的研究相对较少。关于寄生参数研究的方法主要有:(1) 通过实验测量寄生参数的影响^[8],(2) 通过数学公式建立模型,进行相关的理论分析^[9],(3) 通过软件进行仿真,研究寄生参数对于开关和导通过程的影响^[10]。并联 SiC MOSFET 的电流不平衡主要分为动态和静态两个方面。动态电流不平衡是指在开关过程中,漏极电流由于寄生参数,驱动回路等因素所导致的差异。静态电流不平衡是指并联 SiC MOSFET 在完全导通的情况下,由于导通电阻和驱动电压等因素导致的漏极电流不平衡现象。在相同电压等级下采用更高电流等级的碳化硅模块将不存在电流不平衡的问题^[11],同时还能有效降低开关损耗,随着电流等级的提高,碳化硅芯片的制造技术不成熟,产能不足等原因导致的价格偏高,备货不充足等相关问题更严重,难以满足工业生产的需要。对并联芯片进行有效的均流措施可以有效缓解上述问题。因此对并联 SiC MOSFET 电流不平衡影响因素的研究就非常重要,为 SiC MOSFET 更广泛的使用提供理论支持。

本文分析影响并联 SiC MOSFET 电流不平衡的因素,通过仿真实验的方法验证理论分析的正确性。同时还给出了一种基于阻抗平衡联合磁芯电感的方法用以抑制并联电流不平衡,以提高并联 SiC MOSFET 系统的使工作效率。

1 寄生参数对并联 SiC MOSFET 电流不平衡的影响

本文选用 CREE 公司的 C2M008120D 型 SiC MOSFET 为研究对象,采用其官方网站所提供的 spice 模型,搭建相关仿真电路并进行了仿真实验。

图 1 是考虑寄生参数的并联 SiC MOSFET 的仿真测试原理图。图中 V_g 是栅极驱动信号源, R_g 是栅极驱动电阻,包括 SiC MOSFET 内部栅极驱动和外部驱动两部分, DUT1, 2 是两个并联使用的 SiC MOSFET 被测芯片模型。 $L_{g1,2}$ 分别是两个被测芯片的栅极寄生电感, $L_{d1,2}$ 是漏极寄生电感, $L_{s1,2}$ 是源极寄生电感。 $C_{gd1,2}$ 是栅漏极寄生电容, $C_{gs1,2}$ 是栅源极寄生电容, $C_{ds1,2}$ 漏源极寄生电容。 C_{bus} 是母线电容, V_{DD} 作为直流负载电压,设置为 600 V。由数据手册及 spice 模型的库文件得 C2M008120D 部分参数如表 1 所示。

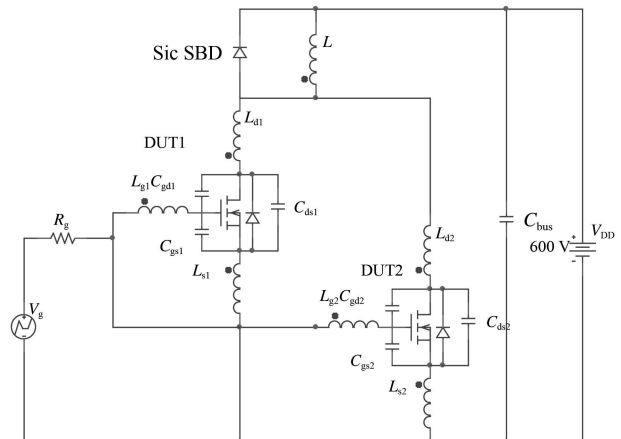


图 1 考虑寄生参数的并联 SiC MOSFET

表 1 基于数据手册的 C2M008120D 静态参数

物理属性	中文名称	典型数值	单位	测试条件
$V_{(BR)DSS}$	漏极击穿电压	1200	V	$V_{gs}=20\text{ V}$
$V_{GS(th)}$	阈值电压	2.2	V	$i_d=20\text{ A}$
R_{dson}	导通电阻	80/150	$m\Omega$	$T_J=25/150\text{ }^\circ\text{C}$
g_t	跨导	9.8/8.5	S	-
C_{iss}	输入电容	950	pF	
C_{oss}	输出电容	80	pF	$V_{gs}=0\text{ V}$
C_{rss}	反向传输电容	6.5	pF	$V_{ds}=1000\text{ V}$
L_s	栅极寄生电感	15	nH	$f=1\text{ MHz}$
L_d	漏极寄生电感	6	nH	
L_g	源极寄生电感	9	nH	

1.1 栅极寄生电感 L_g 对并联 SiC MOSFET 电流不均衡的影响

驱动回路中的栅极寄生电感 L_g , 来源于驱动引线长度和封装过程中引脚长度。栅极寄生电感 L_g 对输入电容 C_{iss} 的充放电速度和开关振荡势必有一定的影响。在仿真实验的过程中仅考虑栅极寄生电感 L_g 的差异, 保持栅极寄生电感 L_{g1} 为 1 nH 不变, 另一支路上栅极寄生电感 L_{g2} 分次设置为 10、20、30 nH, 用以模拟不同栅极寄生电感下, 对并联漏极电流 i_d 的影响程度, 其仿真结果如图 2 所示。

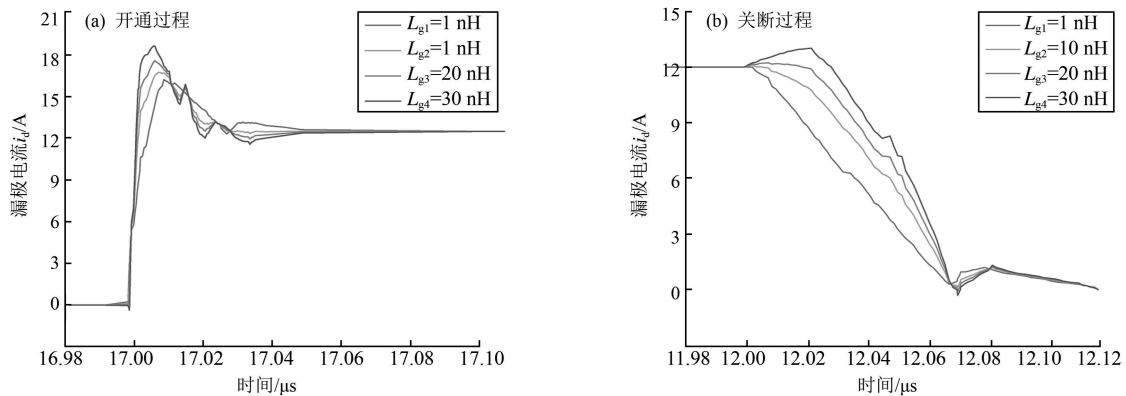


图 2 栅极寄生电感对并联电流不均衡的影响

在并联使用的开通过程中, 并联支路上的漏极电流分别为

$$i_{d1} = g_m (U_g - L_{g1} i_g - V_{th}), \quad (1)$$

$$i_{d2} = g_m (U_g - L_{g2} i_g - V_{th}), \quad (2)$$

g_m 表示器件的跨导, $i_{g1,2}$ 表示栅极驱动电流。在该过程中的电流不均衡度为

$$\lambda = \frac{i_{d1}}{i_{d2}} = \frac{g_m (U_g - L_{g1} i_g - V_{th})}{g_m (U_g - L_{g2} i_g - V_{th})}. \quad (3)$$

由公式(3)以及仿真结果可知, 栅极电感小的器件比栅极电感大的器件更早开通, 而栅极电感大的, 需要分担的电流也更多。栅极寄生电感 L_g 只有在差异较大的情况下才会对并联 SiC MOSFET 开关过程中的电流产生影响, 当两并联 SiC MOSFET 完全导通后, 栅极寄生电感 L_g 对静态电流均衡并无明显的影响。

1.2 漏极寄生电感 L_d 对并联 SiC MOSFET 电流不均衡的影响

漏极寄生电感源于器件封装过程和布线结构, 漏极寄生电感 L_d 与寄生二极管在导通后形成振荡回路, 引起电流振荡, 在关断过程中, 漏源极电容 C_{gs} 开始充电过程, 关断后与之形成振荡回路。在仿真实验的过程中仅考虑漏极寄生电感的差异, 保持栅极寄生电感 L_{d1} 为 6 nH 保持不变, 另一支路上漏极寄生电感分次设置为 4、8、10 nH, 用以模拟不同栅极寄生电感下, 对并联漏极电流 i_d 的影响程度, 开关过程的仿真结果如

图 3 所示,完全导通的仿真结果如图 4 所示。

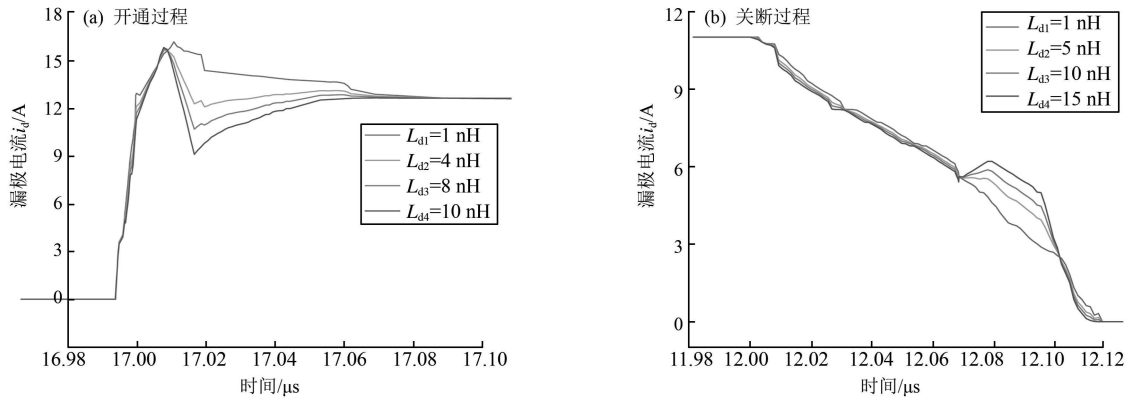


图 3 漏极寄生电感对并联电流不平衡的影响

由仿真结果可知,漏极寄生电感 L_d 对开关过程及导通后的电流不平衡均有较大的影响。漏极电感较大的支路,电流过冲较大,更容易引起电流振荡现象的发生,这也是导致器件损坏的重要原因之一。图 4 中,12 μs 时并联器件由完全导通进入关断状态,电流急剧下降。在完全导通后,由戴维南定理(Thevenin's theorem)得

$$L_{d1} \frac{d_{i1}}{d_t} + R_{d_{son1}} i_{d1} = L_{d2} \frac{d_{i2}}{d_t} + R_{d_{son2}} i_{d2} = U_{dc} - L \frac{d_{iL}}{d_t}, \quad (4)$$

式(4)中的 d_i/d_t 是电流变化率, $R_{d_{son}}$ 是导通电阻。 i_d 是漏极电流, U_{dc} 是母线电压,当导通电阻恒定时,此时的电流差异可以表示为

$$i_m = i_{d1} - i_{d2} = \frac{L_{d1} - L_{d2}}{2R_{d_{son}}} \frac{U_{DD}}{L}. \quad (5)$$

漏极寄生电感的差异直接决定了漏极电流在静态过程中的差异。在开关过程中,漏极寄生电感 L_d 和寄生的体二极管形成谐振回路,引起电流振荡,振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_d C_p}}. \quad (6)$$

关断过程中,漏极寄生电容 L_d 完成对漏源极电容 C_{ds} 充电,并与之形成谐振回路,振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_d C_{gs}}}. \quad (7)$$

漏极寄生电感 L_d 主要影响器件在开关过程中电流上升(下降)后的波形,当 L_d 较大的振荡频率小、阻尼系数小,因此,在开关过程中,较大 L_d 支路的电流过冲大同时振荡幅度也较大。

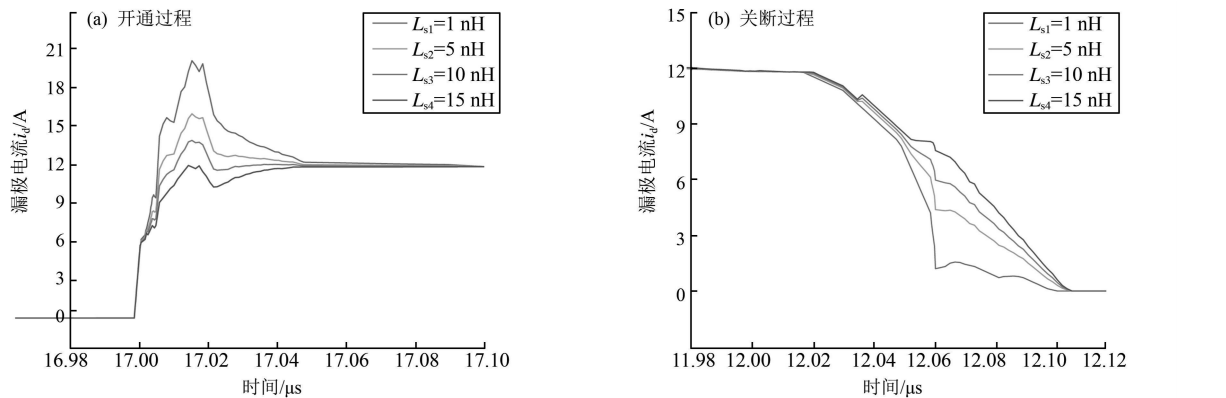


图 4 漏极电感对静态电流不平衡的影响



图 5 源极寄生电感对并联电流不平衡的影响

1.3 源极寄生电感 L_s 对并联 SiC MOSFET 电流不平衡的影响

源极寄生电感 L_s 也是影响并联 SiC MOSFET 电流不平衡的重要因素。在仿真实验的过程中仅考虑源极寄生电感 L_s 的差异,保持源极寄生电感 L_{s1} 为 1 nH 不变,另一支路上漏极寄生电感 L_{s2} 分次设置为 5、10、15 nH,用以模拟不同源极寄生电感下,对并联漏极电流 i_d 的影响程度,其仿真结果如图 5 所示。

源极寄生电感对栅源极电压具有负反馈作用,同时对静态电流几乎为无影响由于在到通知后,电流变化率几乎为零,因此就不会影响电流的变化,如公式(8)所示

$$V_{gs} = V_g - i_g R_g - L_s \frac{d_i}{d_t} \quad (8)$$

在导通过程中,当源极寄生电感较大时, SiC MOSFET 开通较慢,同时承担的电流较小,当并联器件的 L_s 差异增大时, L_s 较小的支路上电流过冲增大。关断过程与之类似。

1.4 栅源极寄生电容 C_{gs} 对并联 SiC MOSFET 电流不平衡的影响

作为电压控制型器件, SiC MOSFET 的开通关断实际上就是对栅极电容充放电的过程,由数据手册可知,器件的在输入电容 C_{iss} 由栅源极电容 C_{gs} 和栅漏极电容 C_{gd} 组成。在仿真实验的过程中仅考虑漏极寄生电感的差异,保持栅源极寄生电容 C_{gs1} 为 900 pF 不变,另一支路上栅源极寄生电容 C_{gs2} 分次设置为 930、960、1000 pF,用以模拟不同栅极寄生电容下,对并联漏极电流 i_d 的影响程度,其仿真结果如图 6 所示。

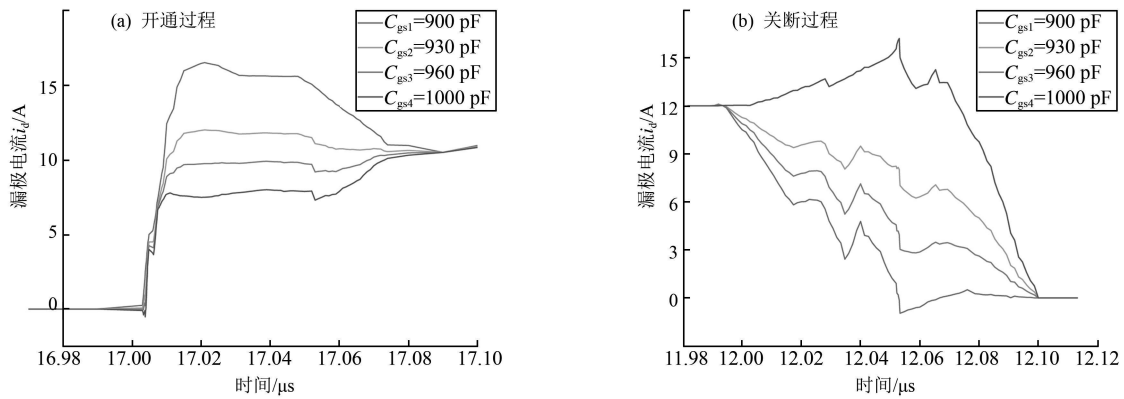


图 6 栅源极寄生电容对并联电流不平衡的影响

从图 6 可以看出,并联 SiC MOSFET 的漏极电流对于栅源极寄生电容非常敏感较小的支路上开关速度较快且漏极电流的波动也很小。在两器件完全导通后,漏极寄生电感 L_d 对静态电流均衡并无明显的影响。 C_{gs} 主要影响栅极电压的上升/下降快慢,在同样的条件下 C_{gs} 较小的器件栅压更早满足阈值,这就直接影响到器件的开关速度。减小栅源极电容与栅极驱动电阻可形成 RC 缓冲电路,可以降低器件的充放电速度,降低器件的开关速度,抑制振荡现象的发生。栅源极寄生电容越大,回路的时间常数越大,充放电时间越长,器件的开关速度越慢。同样,开关速度慢会增加器件损耗,降低器件可工作的开关频率。

SiC MOSFET 的开关过程对 C_{gs} 十分敏感,首先表现在栅极电压的上升/下降速度慢,从而导致了开关过程中电流的不平衡。由于 C_{gs2} 较大,该支路开关速度较慢, C_{gs2} 支路的数值越大,器件开通较慢,它的电流较小。在关断过程中, C_{gs2} 数值越大的支路器件关断更慢,则承受更大的电流。由数据手册可知, SiC MOSFET 的 C_{gd} , C_{ds} 数值较小,不匹配程度也相对小。因此对并联使用的 SiC MOSFET 开关过程中电流不平衡影响也较小,因此文中并未针对上述两参数对并联电流不平衡的抑制进行分析。

2 并联 SiC MOSFET 电流不平衡的抑制

并联 SiC MOSFET 电流均流方法可分为降额法^[12],阻抗平衡法^[13,14]栅极电阻补偿法^[15,16]和有源栅极控制法^[17,18]。本文给出了一种基于阻抗平衡联合磁芯电感的方法用以抑制并联 SiC MOSFET 电路不平衡的现象的发生。

如图 7 所示,是一种基于阻抗平衡和磁芯电感的并联 SiC MOSFET 电流不平衡抑制的电路原理图。其中 R_c 是串联接入并联支路的均流电阻, L_m 表示磁芯电感。在并联 SiC MOSFET 的回路中,

$$U_1 = i_{d1} (R_c + Rd_{son1}), \quad (9)$$

$$U_2 = i_{d2} (R_c + Rd_{son2}). \quad (10)$$

此时,漏极不均衡电流之比

$$\lambda = \frac{i_{d1}}{i_{d2}} = \frac{R_c + Rd_{son1}}{R_c + Rd_{son2}}. \quad (11)$$

将均流电阻 R_c 设置为 1Ω , 远大于数据手册中 $80 \text{ m}\Omega$ 的导通电阻。在导通状态下, 电流处于平衡状态且不会造成过大的损耗。并联 SiC MOSFET 支路中的电流流入匝数、结构完全相同的缠绕在磁芯上的线圈。当并联回路的寄生参数, 功率回路一致时, 漏极流过的电流不会有任何差异。两电流在磁芯中产生的磁通量的矢量和为零, 对流过的电流不会产生作用。相反的, 当电流不均衡, 磁芯电感就会产生相反的磁通相互抵消后的剩余磁通会在磁芯中产生感应电动势, 并作用到电流上升较快的支路上进而使电流趋于平衡状态。由安培环路定理可知

$$ni = \int NH dl = H 2\pi R, \quad (12)$$

式中的 H 表示磁场强度, R 表示磁芯电感的有效半径, n 表示线圈的匝数, i 表示流过线圈的电流大小。两个线圈匝数相同, 线圈回路中的励磁电感 L_m 对两并联支路中电流的不平衡可以起到抑制作用, 其感应电动势 U_f 为

$$U_f = L_m \frac{d\Delta i_d}{dt}. \quad (13)$$

磁感应强度

$$\Delta B = \mu_r \mu_0 (H_1 - H_2), \quad (14)$$

$$S = ah = \frac{1}{2} (R_{max} - R_{min}) h, \quad (15)$$

式中的 B 表示磁感应强度, μ_r 表示磁芯的相对磁导率, μ_0 为空气磁导率, S 为磁芯的横截面积, R_{max} , R_{min} 分别表示磁环内外径的大小。由公式(14)(15)可以得出

$$\Delta B = n\mu_r \mu_0 \frac{i_{d1} - i_{d2}}{2\pi R} = \frac{n\mu_r \mu_0}{2\pi R} \Delta i_d. \quad (16)$$

感应电动势 U_f

$$U_f = L_m \frac{d\Delta i_d}{dt} = \mu_r \mu_0 \frac{n^2 s d}{2\pi R} \frac{d\Delta i_d}{dt}. \quad (17)$$

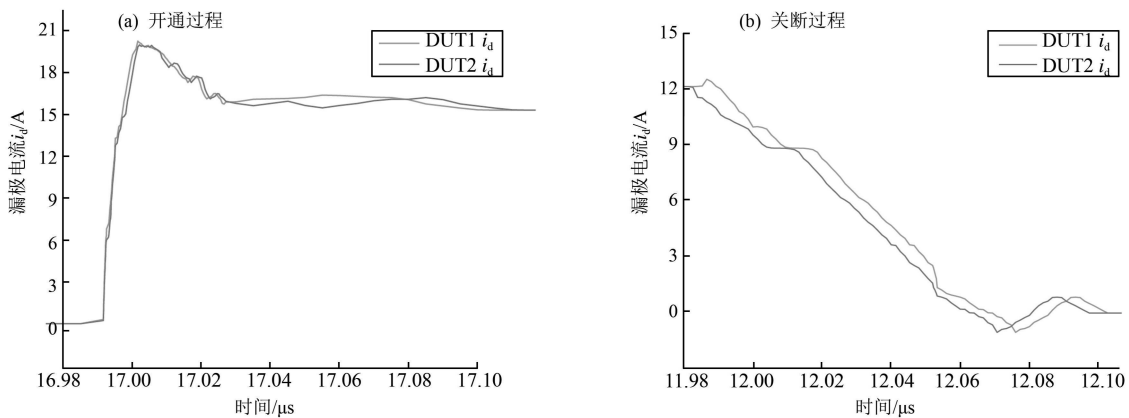


图 8 采取均流措施后开关过程中的漏极电流

磁芯电感抑制电流不平衡的本质在于作用在不平衡电流上的电感是线圈中的励磁电感大于作用在两支

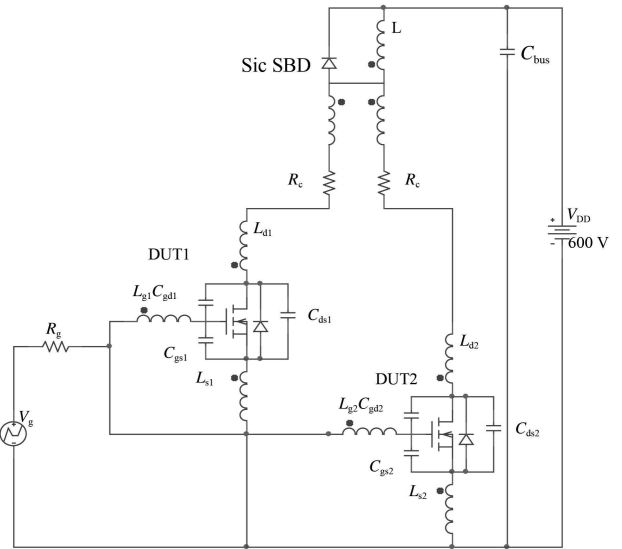


图 7 电路原理图

路电流上的电感。该均流方案适用于所有可能导致电流不平衡因素的抑制,下文将以栅极寄生电容不匹配导致的电流不平衡为例,进行仿真实验的验证。验证结果如图 8 所示。

如图 8 所示,针对栅极寄生电容 C_{gs} 的不匹配所产生的电流不平衡在采用一种基于阻抗平衡和磁芯电感的均流方法后,从图中可以看出相比于原来电流在开关过程中电流不平衡有较大程度的改善。

3 结语

本文针对可能导致并联 SiC MOSFET 电流不平衡的因素,基于 CREE 官网提供的 spice 模型进行了相关的仿真及理论分析。还给出了一种基于阻抗平衡联合磁芯电感的均流方法,该方法能有效抑制各种因素导致的动静态电流不平衡现象的发生。

(1) 并联使用的 SiC MOSFET 可以有效提高系统的功率密度。寄生参数不匹配会导致的并联电流不平衡,严重威胁回路的安全工作。源极寄生电感 L_s 和栅源极寄生电容 C_{gs} 对开关过程中电流不平衡有较大的影响而对导通之后的电流不平衡则影响较小可以忽略。漏极寄生电感 L_d 则主要影响静态电流不平衡而栅极寄生电感 L_g 只有在数值差异较大的情况下才会对动态电流不平衡产生影响。因此,在并联使用 SiC MOSFET 的过程中,芯片的寄生参数不匹配会严重影响到并联电流不平衡程度,进而威胁回路安全工作。

(2) 在并联 SiC MOSFET 工程中,不平衡电流流过均流电阻和磁芯电感,磁芯电感会产生较大的励磁电感,抑制并联过程中的不平衡电流,从而有效改善电流不平衡现象的发生。串联接入的均流电阻和磁芯电感对动静态电流不平衡有良好的抑制效果,能有效保护电路提高工作效率。

参 考 文 献

- [1] 盛况,任娜,徐弘毅.碳化硅功率器件技术综述与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(6):1741-1753.
- [2] 李玉强,刘超,柴永灏,等.量子阱厚度和势垒掺杂对大功率 AlGaInP LED 发光效率衰减特性的影响 [J].聊城大学学报(自然科学版),2018,31(4):37-41.
- [3] 盛况,郭清,张军明,等.碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J].中国电机工程学报,2012,32(30):1-7.
- [4] 徐德鸿,徐文杰,何国锋,等.新能源对电力电子提出的新课题[J].电源学报,2014,12(6):4-9.
- [5] MITO Z, MAO Y, NGO K, et al. Package influence on the simulated performance of 1.2 kV SiC MOSFET modules[J]. Workshop on Wide-Bandgap Power Devices and Applications, 2015, 16: 306-311.
- [6] 徐国林,朱夏飞,刘先正,等.基于 PSpice 的碳化硅 MOSFET 的建模与仿真[J].智能电网,2015,3(6):507-511.
- [7] 赵斌.SiC 功率器件特性及其在 Buck 变换器中的应用研究 [D].南京:航空航天大学,2014.
- [8] 滕咏喆,高强,张乾,等.考虑器件工作温度影响的 SiC 功率 MOSFET 建模[J].中国电机工程学报,2020,40(3):932-942.
- [9] CHEN K, ZHAO Z, YUAN L, et al. The impact of nonlinear junction capacitance on switching transient and its modeling for SiC MOSFET [J]. Transactions on Electron Devices, 2015, 62(2): 333-338.
- [10] CHEN J F, LIN J N, AI T H. The techniques of the serial and paralleled IGBTs [J]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2002, 2(2): 999-1004.
- [11] JAHDI S, ALATISE O, FISHER C, et al. An evaluation of silicon carbide unipolar technologies for electric vehicle drive-trains[J]. Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 517-528.
- [12] HAIDER S, Li G, WANG K. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 111-118.
- [13] 查申森,郑建勇,苏麟,等.大功率 IGBT 并联运行时均流问题研究[J].电力自动化设备,2005,25(7):32-34.
- [14] ABDI B, RANJBAR A H, MALEKIAN K. Problems associated with parallel performance of high current semiconductor switches and their remedy[J]. Automation and Motion, 2008, 4(3): 1379-1383.
- [15] 臧小惠,惠晶,沈锦飞.大容量逆变电源 IGBT 并联应用的仿真分析[J].计算机仿真,2006,23(2):197-199.
- [16] ZHOU Q, GAO F, JIANG T. A gate driver of SiC MOSFET with passive triggered auxiliary transistor in a phase-leg configuration[J]. Energy Conversion Congress & Exposition, 2015 62(8): 7023-7030.
- [17] BORTIS D, BIELA J, KOLAR J W. Active gate control for current balancing of parallel-connected IGBT modules in solid-state modulators [J]. Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2632-2637.
- [18] SASAKI M, NISHIO H, NG W T. Dynamic Gate Resistance Control for Current Balancing in Parallel Connected IGBTs[C]. // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013.

自聚焦圆贝塞尔高斯涡旋光束在自由空间中的传播特性

江俊杰,邓冬梅

(华南师范大学 广东省微纳光子功能与器件重点实验室,广东 广州 510631)

摘要 根据近轴光场方程及分步傅里叶算法,数值模拟了圆贝塞尔高斯涡旋光束在自由空间的传播。与传统自聚焦光束相比,其聚焦距离更长,焦平面强度更高。通过缩放光斑的初始尺寸,光束的聚焦特性也会随之改变。由于焦点处存在中空区域并携带轨道角动量,其在粒子捕获有着应用前景。此外,还研究了涡旋形式对该光束的影响。

关键词 光学涡旋;贝塞尔光束;自聚焦光束

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Propagation Dynamics of Autofocusing Circular Bessel Gaussian Vortex Beams in Free Space

JIANG Junjie, DENG Dongmei

(Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices,
South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract Based on the split-step Fourier method and paraxial wave equation, we introduce a new class of Circular Bessel Gaussian Vortex Beams (CBGVs) with the autofocusing property and investigate their propagation dynamics in free space. By increasing the beam size, the focus properties of CBGVs will change. Propagation dynamics of CBGVs with an on-axis vortex and off-axis vortex is also investigated.

Key words optical vortices; Bessel beams; autofocusing

0 引言

2010年, Efremidis^[1]等人首次提出了具有激增自聚焦特性的径向对称波包。这类光束有一个特殊的性质,即在传播过程中,它们的最大强度几乎保持不变,而在焦点处突然以数量级激增。与克尔介质(Kerr Media)产生的自聚焦效应不同的是,这类光束的自聚焦是纯线性的,是光场结构本身的结果^[2]。随后, Efremidis^[3]和 Panagiotopoulos^[5]通过实验证实这种光束确实存在。激增自聚焦光束在烧灼点的形成^[3],介电微粒子的光学捕获和操纵^[4,6,7]以及非线性强光子弹的产生^[5]有着独特的应用前景。然而,对于传统的自聚焦

收稿日期:2020-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(11775083,11374108);广东省攀登计划(pdjh2020a0149)资助

通讯作者:邓冬梅,女,汉族,博士,研究员,研究方向:光信息传输与处理;自加速光束及涡旋光束的传输及其应用, E-mail: dmdeng@263.net。

光束而言,即环艾里高斯光束,对于较长的传播距离时,其自聚焦能力由于焦平面强度相对较低而受到限制。

1987年,Durnin等人推导出亥姆霍兹方程的精确解,即贝塞尔模式,是非衍射光束族的重要成员^[8-10]。由于贝塞尔光束的准无衍射特性,它可以应用于不同的领域,如光学操控^[11]、自由空间光通信^[12,13]、显微镜成像^[14]等。

光学涡旋(Optical Vortices)是一种具有螺旋相位波前,带有轨道角动量(OAM),能够携带不同拓扑电荷数的光束。对于有 l 个拓扑荷的涡旋光束,绕光束传播方向(z 轴)一周,相位改变 $2l\pi$,光束横截面中心处振幅为0,在 z 轴上存在相位奇异。涡旋光束在光通信^[15-17]、光学捕获^[18]、光学显微镜^[19]等方面有广泛的应用。近年来,嵌入不同类型自动聚焦光束的涡旋光束得到了广泛的研究^[20-23]。

根据现有研究成果,提出一种可以在长距离内实现焦平面强度较高的自聚焦新型圆贝塞尔高斯涡旋光束(Circular Bessel Gaussian Vortex Beams,简称CBGVs),并系统的研究了它在自由空间的传播特性。

1 同轴涡旋的自聚焦圆贝塞尔高斯涡旋光束的传播特性

我们假定CBGVs在自由空间中传播,在傍轴光学系统中,波的复包络服从傍轴亥姆霍兹方程,即

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2ik_0 \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

其中 u 为光波的复振幅, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为波长。

在柱坐标系中,带有同轴涡旋的CBGVs初始光场表达式为

$$u(r, \varphi, z=0) = CJ_n \left(\frac{r_0 - r}{w_0} \right) \exp \left[-a \left(\frac{r_0 - r}{w_0} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{w_0} \right)^m \exp(im\varphi), \quad (2)$$

其中 C 为控制初始输入功率的无量纲常数, J_n 为 n 阶第一类贝塞尔函数,当 $n=0$ 时, r_0 为主环的半径,当 $n>0$ 时, r_0 为两个主环的中点(如图1(a)所示), w_0 为长度参数, m 为拓扑荷数, a 为控制初始光束衰减的衰减系数, z 为光束传播距离。

由于CBGVs在自由空间的传播解析表达式难以求出,我们这里将采用分步傅里叶循环的方法^[24]来数值模拟其传播过程。若未作其他特殊说明,本文的部分参数选取如: $C=1$, $r_0=3$ mm, $w_0=20$ μ m, $a=0.001$, $n=1$, $\lambda=632.8$ nm。

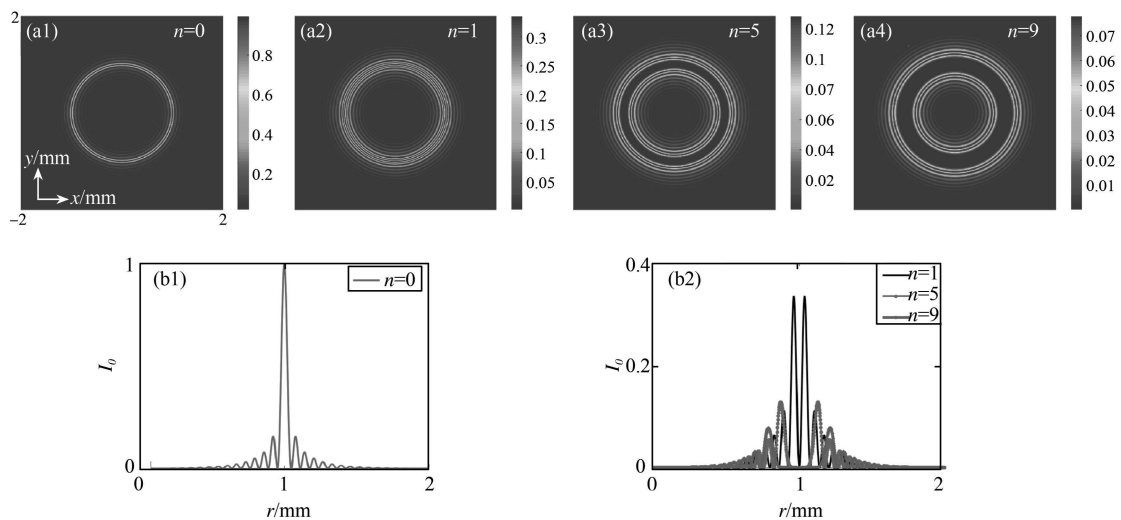


图1 (a) CBGVs的横截面光场分布;(b) CBGVs的初始强度 I_0 与 r 的关系

图1给出了部分CBGVs的横向截面图以及光场分布情况,其中 I_0 代表初始平面的光强,为了现象更加明显,这里我们取 $r_0=1$ mm, $m=0$ 。从图1我们可以看到,初始强度分布是关于 $r=r_0$ 对称的。从图1(a)我们可以看到,零阶CBGVs在 $r=r_0$ 处有一个主环,而高阶的CBGVs则有两个环且对称分布在 $r=$

r_0 的两侧。注意到在光束内部区域 ($r < r_0$), 随着 r 的增加, 其强度也不断增大, 并最终在里面那个环取得极值, 随后, 随着 r 的增加, 强度却不断下降并最终达到零。因此, 光束的内部区域在传播过程中会经历自动散焦而不是自动聚焦。然而, 在光束的外部区域 ($r > r_0$) 却有着刚好相反的行为。从图 1 我们可以看到, 随着阶数 n 的不断增大, 强度为 0 的区域也会不断变大。因此, 当 n 较低时, $r = r_0$ 处的空心区域较小, 外圈和内圈引起的聚焦变得很近, 这可能会增强自动聚焦特性。为了更好地展现 CBGVBs 的聚焦特性, 下文中的讨论我们都令 $n = 1$ 。

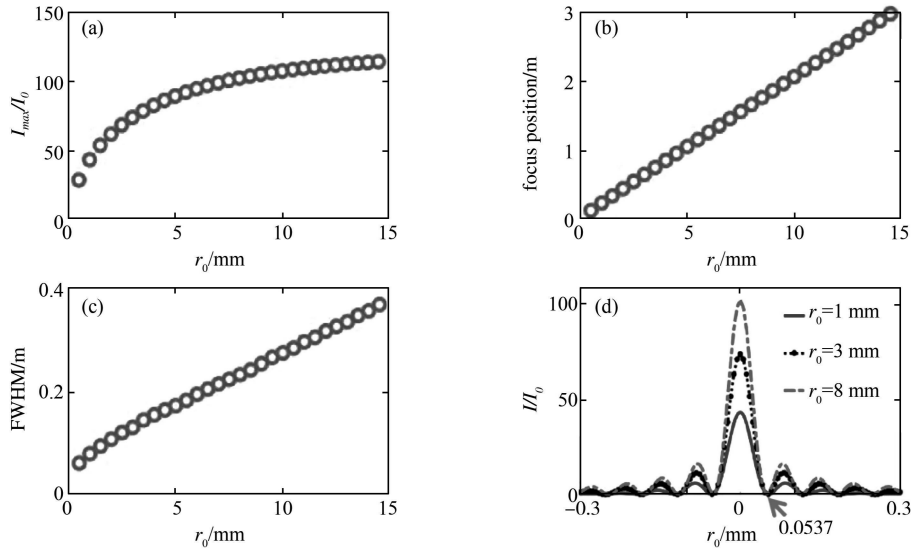


图 2 聚焦特性与 r_0 的关系 (a) I_{\max}/I_0 与 r_0 的关系; (b) 聚焦位置与 r_0 的关系; (c) 半高全宽与 r_0 的关系; (d) 不同 r_0 对应的焦平面横向分布

图 2 展示了当 $m = 0$ 时, 光束初始半径 r_0 对聚焦特性的影响。图 2(a) 的纵坐标 I_{\max}/I_0 为归一化强度 (任意位置的最大强度与初始输入强度的比值), 而 (c) 中的 FWHM 为半高全宽 (full width at half maximum)。从图 2(a) 我们可以看出随着 r_0 的增加, 归一化强度也随着光束功率的增加而增加。从图 2(b)(c) 中可以看出, CBGVBs 的焦距和半高全宽几乎随 r_0 的增加而线性增加。然而, 如图 2(d) 所示, 即使 r_0 发生改变, 焦平面内的光斑大小基本不变, 半径约为 $53.7 \mu\text{m}$, 因此, 当我们缩放光斑的初始尺寸 r_0 时, 光束的聚焦特性即聚焦强度, 焦距及半高全宽会同时发生改变。

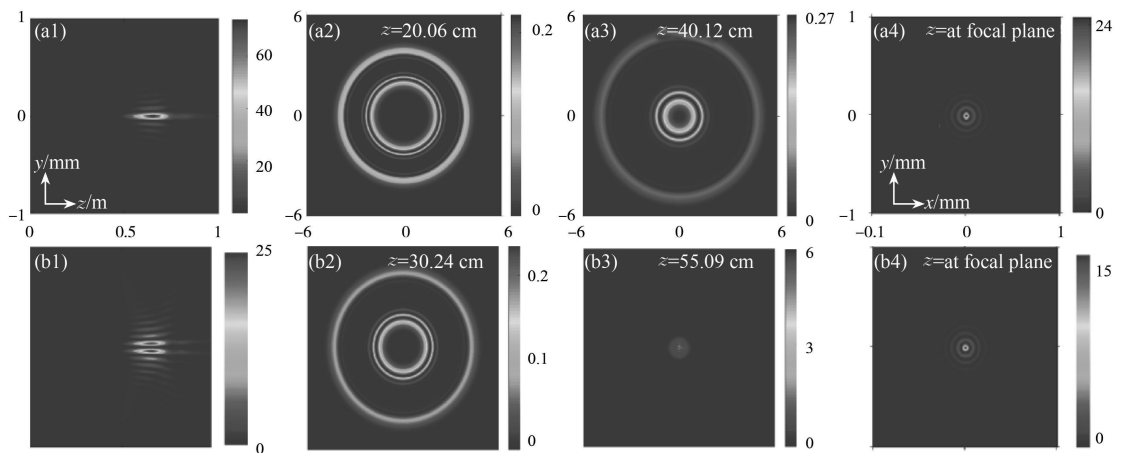


图 3 CBGVBs 的传播侧视图及部分截面图 (a) $m = 0$; (b) $m = 1$ 其中 (a)(b) 图的坐标上下对应

图 3 给出了 $m = 0$ 和 $m = 1$ 的传播侧视图 (z - y 图) 及部分截面图, 其中 colorbar 代表归一化强度 $I/I_{0\max}$ (任意位置处的强度与初始输入强度最大值的比值), 从图 3 的 (a1)、(b1) 可以看出 CBGVBs 沿 z 轴传播的过程中, 强度不断增加, 并在焦平面前激增自聚焦。同时, 图 3 的 (a4)、(b4) 以及图 2 的 (d) 表明光束在达到焦平面前, 光斑不断缩小, 即强度不断向光束中心聚焦。与传统的圆贝塞尔光束相比 ($m = 0$), 当 $m = 1$ 时,

CBGVs 沿 z 轴存在一个由同轴涡旋引起的中空通道。从图 4(b)我们可以看到,当 $m > 0$ 时,CBGVBs 的归一化强度比 $m = 0$ 时要小得多。并且当 m 增大时,光束的归一化强度变小,而光束中心的零强度区域变大。这一特殊性在粒子捕获这一应用中有着极其重要的作用。近年来,圆贝塞尔光束已被广泛应用于粒子的操纵和捕获^[10],与普通的光镊设置相比,因其突变聚焦特性而使用了放大率较低的物镜。但由于其在焦点处的强度分布不是中空的,传统的圆贝塞尔光束($m = 0$)不适合捕获折射率小于周围介质的微粒。并且传统贝塞尔光束并不携带轨道角动量,这在光扳手以及光镊的应用上是非常不利的。因此,焦平面为存在中空区域且携带轨道角动量的圆贝塞尔高斯涡旋光束有着更广泛的应用。此外,拓扑荷为 $m = 0, 1, 2$ 的 CBGVs 分别在 $z = 65.2, 65.6, 65.8$ cm 处聚焦。可以看到,当 m 上升时,聚焦位置也会稍稍后移。

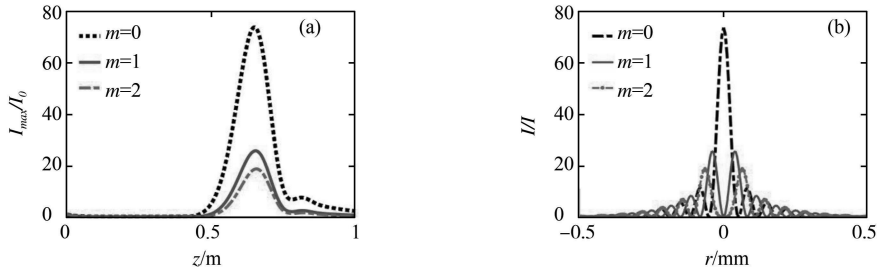


图 4 (a) CBGVs 传播过程中的归一化强度与 z 和 m 的关系图;(b) CBGVs 在焦平面处的归一化强度与 r 和 m 的关系图

2 对称双离轴涡旋的圆贝塞尔高斯光束的传输特性

近几十年来,如何产生高质量的涡旋光场成为人们研究的一个热点内容,这其中就包括无衍射光束^[25]。然而,在产生涡旋光束的过程中,较难保证涡旋轴与传播轴完全重合,也就是说产生的涡旋具有一定的离轴量。因此,研究离轴涡旋的圆贝塞尔高斯光束是十分有必要的,为了计算简便,我们假定两个涡旋沿 x 轴对称放置,则其光场表达式可写为

$$u(r, \varphi, z=0) = \frac{C}{\tau w_0^2} J_n \left(\frac{r_0 - r}{\tau w_0} \right) \exp \left[-a \left(\frac{r_0 - r}{\tau w_0} \right)^2 \right] (r e^{i\varphi} + r_k)(r e^{\pm i\varphi} - r_k), \quad (3)$$

其中 \pm 代表涡旋方向,即拓扑荷为 $(+1, -1)$ 或 $(+1, +1)$,两个涡旋的初始距离为 $2r_k$ 。

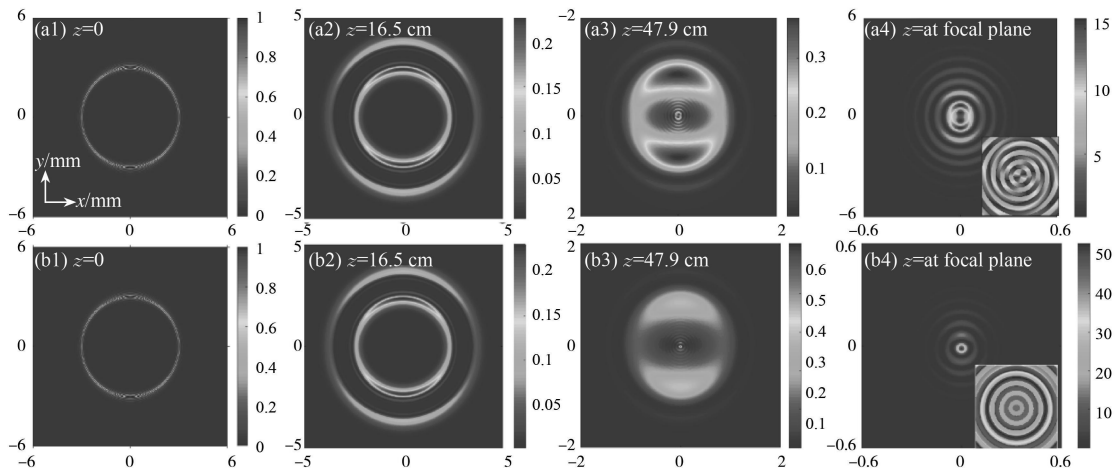


图 5 CBGVs 部分传播侧视图,其中(a4)(b4)分别为焦平面($z = 65.8, 65.9$ cm)的归一化强度和相位图,其中(a1)-(a4)的拓扑荷为 $(+1, +1)$, $r_k = 1.5$ mm,(b1)-(b4)的拓扑荷为 $(+1, -1)$, $r_k = 1.5$ mm

从图 5(a1)-(b4)中,我们可以发现拓扑荷为 $(+1, +1)$ 的两个光学涡旋叠加时,二者都有向中心收拢的趋势,并在焦平面处重叠但不完全重合(从相位图可以看出),同时,在光束的中心附近有两个中空洞,归一化强度较低。从相位图上可以看出,在光源附近存在两个相邻的奇点,即在传播过程中有两个相同的涡旋向光束中心偏移。然而,如果两个相反的涡旋加在 CBGVs 上,它们在传播过程中发生碰撞并湮灭。归一化强

度分布图(图 5(b4))和相位图与 $m = 0$ 时 CBGVBs 的情况相似,只是焦平面的主瓣略微向上移动。

接下来,我们将研究不同涡旋位置而产生的影响。我们分别将涡旋放置在初始光束中空区域($r_k = r_0$)以及区域外部($r_k > r_0$)。如图 6 所示,当 $r_k = r_0$ 时,其传播情况与 $r_k = 1.5$ mm 类似,但其沿 x 轴存在一条缝隙。焦平面内沿 y 轴存在两个主瓣,从其相位图我们可以看出,两个主瓣之间的相位差近似为 π ,相位沿 x 轴分布混乱。如图 6(b1)-(b4)所示,当两个相反的涡旋位于入射光束的两个主环外时,焦平面的主瓣向下位移,与图 5(b1)-(b4)中的情况相反。

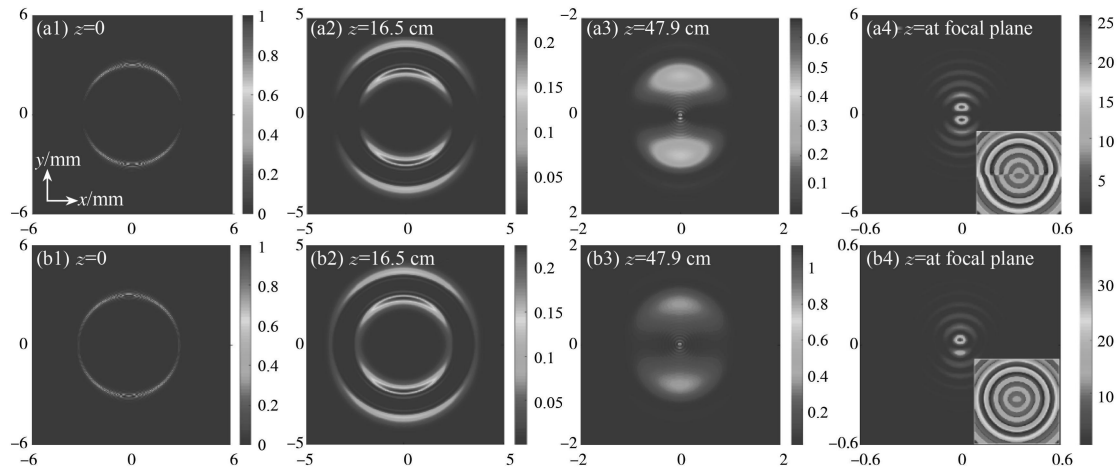


图 6 CBGVBs 部分传播侧视图,其中(a4)(b4)分别为焦平面($z = 65.7$ cm, $z = 65.2$ cm)的归一化强度和相位图,其中(a1)-(b4)的拓扑荷均为 $(+1, -1)$, (a1)-(a4)中 $r_k = 3$ mm, (b1)-(b4)中 $r_k = 4.5$ mm

4 结论

本文系统地研究了 CBGVBs 在自由空间的传播特性,我们发现可以通过改变输入光束的尺寸 r_0 来控制聚焦位置、聚焦强度和半高全宽。与传统的自聚焦光束相比,CBGVBs 可以在更长的距离和更小的衍射范围内自动对焦。同时,得益于光学涡旋的作用,我们发现 CBGVBs 在焦平面处有一个中空区域,这一特性在捕获折射率小于周围介质的微粒有着重要的应用前景。除此之外,我们还讨论了带有双对称离轴涡旋的 CBGVBs 的性质,通过改变 r_k 以及涡旋形式,涡旋会发生重叠,碰撞湮灭等等现象。

参 考 文 献

- [1] EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N. Abruptly autofocusing waves[J]. Optics Letters, 2010, 35: 4045-4047.
- [2] CHREMMOS I, EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N. Preengineered abruptly autofocusing beams[J]. Optics Letters, 2011, 36: 1890-1892.
- [3] PAPAZOGLU D G, EFREMIDIS N K, CHRISTODOULIDES D N, et al. Observation of abruptly autofocusing waves[J]. Optics Letters, 2011, 36: 1842-1844.
- [4] ZHANG P, PRAKASH J, ZHANG Z, et al. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing airy beams[J]. Optics Letters, 2011, 36: 2883-2885.
- [5] PANAGIOTOPOULOS P, PAPAZOGLU D G, COUAIROUAND A, et al. Sharply autofocused ring-airy beams transforming into non-linear intense light bullets[J]. Nature Communication, 2013, 4: 2622-2627.
- [6] LU W, SUN X, CHEN H, et al. Abruptly autofocusing property and optical manipulation of circular airy beams[J]. Physical Review A, 2019, 99: 013817.
- [7] JIANG Y, HUANG K, LU X. Radiation force of abruptly autofocusing airy beams on a rayleigh particle[J]. Optics Express, 2013, 21: 24413-24421.
- [8] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letter, 1987 58: 1499-1501.
- [9] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. the scalar theory[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4: 651-654.
- [10] ARLT J, GARCES CHAVEZ V, SIBBETT W, et al. Optical micromanipulation using a bessel light beam[J]. Optics Communication, 2001,

197;239-245.

- [11] NELSON W, PALASTRO J P, DAVIS C C, et al. Propagation of bessel and airy beams through atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31:603-609.
- [12] BIRCH P, ITUEN I, YOUNG R, et al. Long-distance bessel beam propagation through kolmogorov turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 2:2066-2073.
- [13] PLANCHON T, GAO L, MILKIE D, et al. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using bessel beam plane illumination[J]. *Nature Methods*, 2011, 8:417-423.
- [14] NYE J F, BERRY M V. Dislocations in wave trains[J]. *Proceedings of the Royal Society -Mathematical Physics and Engineering Sciences*, 1974, 336:165-190.
- [15] YAN Y, XIE G, LAVERY M, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communication*, 2014, 5:4876.
- [16] YAN X, GUO L, CHENG M, et al. Controlling abruptly autofocusing vortex beams to mitigate crosstalk and vortex splitting in free-space optical communication[J]. *Optics Express*, 2018, 26:12605-12619.
- [17] YAN X, GUO L, CHENG M, et al. Probability density of orbital angular momentum mode of autofocusing airy beam carrying power-exponent-phase vortex through weak anisotropic atmosphere turbulence[J]. *Optics Express*, 2017, 25:15286-15298.
- [18] GAHAGAN K T, SWARTZLANDER G A. Optical vortex trapping of Particles[J]. *Optics Letters*, 1996, 21:827-829.
- [19] YAN L, GREGG P, KARIMI E, et al. Q-plate enabled spectrally diverse orbital-angularmomentum conversion for stimulated emission depletion microscopy[J]. *Optica*, 2015, 2:900-903.
- [20] CHEN X, DENG D, WANG G, et al. Abruptly autofocused and rotated circular chirp pearcey gaussian vortex beams[J]. *Optics Letters*, 2019, 44:955-958.
- [21] YU W, ZHAO S, JIANG P, et al. Propagation dynamics of janus vortex waves[J]. *Optics Express*, 2019, 27:34484-34495.
- [22] SUN C, DENG D, YANG X, et al. Propagation dynamics of autofocusing circle pearcey gaussian vortex beams in a harmonic potential[J]. *Optics Express*, 2020, 28:325-333.
- [23] JIANG Y, HUANG K, LU X. Propagation dynamics of abruptly autofocusing airy beams with optical vortices[J]. *Optics Express*, 2012, 20:18579-18584.
- [24] POON T C, KIM T. *Engineering Optics With Matlab[M]*. World Scientific, 2006.
- [25] 高垣梅, 卢城臻. 含多阶涡旋的无衍射阵列光束的设计[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(2):42-46.