光控多门极晶闸管的多种工作模式*

王凌云^{1)2)†} 刘宏伟²⁾ 袁建强²⁾ 谢卫平²⁾ 栾崇彪²⁾ 李洪涛²⁾ 张建德¹⁾ 谌怡²⁾ 何決²⁾ 刘小俐³⁾ 高彬⁴⁾

(国防科技大学前沿交叉学科学院,长沙 410073)
 (中国工程物理研究院流体物理研究所,绵阳 621900)
 3)(湖北台基半导体股份有限公司,襄阳 441000)
 4)(四川质安高电压工程技术研究中心,绵阳 621900)
 (2024年11月19日收到;2025年1月10日收到修改稿)

为了提升半导体开关的峰值功率与导通速度,针对光控多门极晶闸管结构开展了系列实验研究,重点探讨了不同光注入参数对开关特性的影响.研究发现,在不同激光峰值功率条件下,开关芯片展现出不同的导通特性.通过建立开关模型,并对注入光参数及电路参数进行对比分析,本工作提出了光控多门极晶闸管的3种工作模式设想:光致线性模式(A模式)、场致非线性模式(C模式)和混合放大模式(B模式).为验证这些工作模式,我们进行了针对性的验证测试,结果证实了该光控多门极晶闸管具有不同导通特性的工作模式.开关多工作模式的发现与验证,大幅度提升了功率半导体开关器件的导通速度(di/dt)水平和峰值功率.在23 mm 直径芯片上,A模式获得了4 kV,8 kA,440 kA/µs 的窄脉冲;C模式获得了8.5 kV,6.0 kA,55 kA/µs 的宽脉冲;在38 mm 直径芯片上,B模式获得了4.6 kV,8.5 kA,129 kA/µs 的宽脉冲.这些成果为超高峰值功率半导体开关组件的研发奠定了坚实的理论与实验基础.

关键词:脉冲功率,光控开关,多模式,导通速度 PACS: 84.30.Jc, 85.30.-z, 42.65.Pc, 52.38.Kd CSTR: 32037.14.aps.74.20241608

DOI: 10.7498/aps.74.20241608

1 引 言

气体开关由于峰值功率高、导通时间快等优势 被广泛用于各种脉冲功率源中^[1-3],随着电力电子、 雷达、加速器、可控核聚变等技术领域的迅速发展, 对脉冲功率源系统及其开关技术提出更高的要 求^[1-3].由于半导体材料、工艺与技术的不断进步, 逐步产生了多种类型的新型半导体开关,逐步替 代传统的气体类开关.以电力电子技术为牵引的这 类器件,主要以耐受直流电压为主,包含晶闸管 SCR^[4]、光控晶闸管LTT^[5,6]、集成门极可关断晶闸 管 IGCT^[7]、绝缘栅双极性晶体管 IGBT^[8,9]、超级 晶闸管 SGTO^[10-12]、场控晶闸管 MCT^[13]、金属氧 化物场效应晶体管 MOSFET^[14,15]、雪崩三极管^[16] 等,其功率容量与工作频率如图 1 所示,这类器件 峰值功率通过串联后,峰值功率较高,但导通速度 不及传统气体开关.

以脉冲功率技术牵引的开关器件, 主要以耐受脉冲电压为主, 并包含断路型开关, 如半导体断路 开关 SOS^[17]、光导开关 PCSS^[18,19]、反向开关晶体 管 RSD^[20]、延迟击穿器件 DBD^[21]、快速离化二极 管 FID^[22,23]、阶跃恢复二极管 DSRD^[24]等, 开关的 功率容量与工作频率如图 2 所示, 这类开关导通速

^{*} 装发预研基金 (批准号: 614260501030117) 和国家自然科学基金 (批准号: 51807185) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 101kpa@sina.com

^{© 2025} 中国物理学会 Chinese Physical Society

度较快,峰值功率也较高,但开通的脉冲宽度受到 一定程度的限制,且依赖于前级的特殊压缩电路或 初级脉冲充电电路.



图 1 耐受直流型固态开关器件







这些开关在部分技术指标上,有着各自的优势,但在高峰值功率、快导通速度、低功率充电这3个核心指标上相互制约,在一个器件上,难以同时实现.功率半导体开关器件一般可以实现直流充电,即低功率充电,但难以实现快速导通,当峰值功率较高时,导通速度迅速降低.高压固态开关部分是基于功率半导体开关串并联,以增大器件的规模以提升峰值功率;另一种主要依靠前级压缩,开关进行放大开通时,前级已经具备较高的充电功率,从而实现后级更高的峰值功率.分析开关器件的峰值功率限制因素,发现其主要限制在于在同一个器件上,难以实现较高的功率比值(输出功率与输入功率之比),当提升峰值功率后导通速度降低

或者依赖于高峰值功率充电;当导通速度提升后, 器件峰值功率降低或依赖于高峰值功率充电.如何 结合各种器件的优势,研制一款可同时实现高峰值 功率、快导通速度、直流充电的固态器件,对于重 频长寿命脉冲功率系统的发展尤为重要.

2 光控多门极晶闸管结构与不同模式 设想

2.1 光控多门极晶闸管结构

晶闸管器件结构具有较高的峰值功率与较宽 的导通时间,光导开关具有较快的导通速度和较高 的隔离电压,在结合两者的优势基础上,研制的高 压光控脉冲晶闸管具备了较高的峰值功率和较快 的导通速度.但由于电流集中效应等限制,导致开 关 di/dt 指标限制在数十 kA/µs. 为了弥补高压光 控脉冲晶闸管[6,25] 开关导通速度不足的缺陷, 提出 并研制了光控多门极晶闸管,其开关芯片结构如 图 3 所示. 芯片结构为 PNPN 四层结构, 从最底部 的 P 区直接引出正电极;顶部的 P 区为多个独立 的区域,用于接收触发光能量;顶部的N区被分割 成不同区域但保持电连接,从而引出负电极. 当激 光照射时,中间半导体层激发产生大量载流子,相 当于产生了较大的控制极电流,器件就由阻断状态 转换为导通状态;由于多个门极同时注入激光,从 而多个区域同步开通,使得导通速度成倍叠加;另 因激光照射激发产生载流子不受结电容的影响,当 输入激光前沿较快时,开关的导通速率也非常快, 从而可实现高功率快前沿输出.



图 3 开关芯片结构示意图 Fig. 3. Schematic diagram of switch chip structure.



图 4 器件元胞结构尺寸与正向电场分布图 Fig. 4. Cell structure dimensions and forward electric field distribution diagram of the chip.

将器件设计成正向与反向均可耐受直流电压 的对称结构,半导体器件片厚为 1400 μm,所选择 衬底材料电阻率为 550 Ω·cm,其中正压引出电极 做满电极、负压引出电极宽度设计为 400 μm,光注 入区域宽度设计为 600 μm.从衬底电阻率出发,通 过确定衬底材料掺杂浓度为 8.06×10¹² cm⁻³、P 型 基区与阳极区域表面掺杂浓度为 6.3×10¹⁶ cm⁻³、 N⁺区表面掺杂浓度为 1.2×10¹⁹ cm⁻³、结合器件结 构尺寸参数,仿真计算得到器件耐压的电场分布 与 *B-V*特性曲线,其中器件元胞结构尺寸与正向 电场分布如图 4 所示.仿真得到器件的正向耐压 为 7.8 kV,反向耐压为 7.9 kV,其适用于在均匀掺 杂衬底上进行扩散 (高斯分布).

根据该结构,按照台面工艺,流片完成了多种 尺寸的光控多门极晶闸管芯片,直径分别为23, 38,50 mm等,如图5所示.其中门极区域设计按 照1,7,19进行排列、芯片直径为38 mm和50 mm 时,采用7个门极区域进行排列.



2.2 测试出现的多种特殊导通特性

为了研究触发参数与器件峰值功率及导通速 度的关系,首先关注了工程上容易获得的多种激 光波长对器件导通的影响,主要有1064,905,808, 532 nm 等,这几种典型波长均可以使开关触发导 通,其中 Si 材料的吸收系数随典型光波长的变化 而变化.为了获得更经济、更高的吸收效率,注入 激光采用波长为1064 nm,针对性开展了不同激光 能量固定脉宽下,器件的开通性能研究.采用芯片 直径为23 nm,光斑直径为10 nm,芯片接受窗 口直径与光斑直径一致.在固定电压为4.5 kV下, 采用低电感脉冲电容器,较低电阻负载对其输出电 流、输出电流前沿、电压下降沿、输出与激光之间 的延迟时间等进行测试.电路如图 6(a)所示,测试 电路照片如图 6(b)所示,采用电容容量为2 μF, 负载电阻为0.37 Ω.

将注入的光参数、输出的电参数、开关峰值功 率、开关的功率比值(输出电功率与注入激光功率 比值)等进行测试与统计计算,数据如表1所示, 其中发现了一部分特殊的导通特性,其与晶闸管器 件和光导开关器件的规律均有所不同.

根据实验数据分析,器件注入的激光功率 从 4.8 kW—2.16 MW 变化时,开关的峰值功率从 35—47 MW,没有明显的线性变化关系,其导通特 性主要与晶闸管一致.而注入激光功率与开关的 di/dt呈现出明显的线性关系,其导通特性与光导 开关的线性模式一致,如图 7 所示.当注入的激光



图 6 光控多门极晶闸管测试电路及照片 (a)测试电路原理图; (b)测试电路照片

Fig. 6. Optically controlled multi-gate thyristor test circuit and photos: (a) Schematic diagram of the test circuit; (b) photo of the test circuit.

± 1	「油ん」レークー来ん	 エロシントレー	ヘット 七日 土
A		71777771	32V 4H-X
1X I		+ 22 84 6 7	"". XX 1/1 1/1 X

Table 1. Experimental data table of laser parameters and typical switch parameters.

激光功率 /MW	激光能量 /mJ	充电电压 /kV	电压下降 时间/ns	电流峰值 /kA	电流上升 时间/ns	导通延迟 时间/ns	电流脉冲 宽度/ns	开关峰值 功率/MW	功率 比值 N	$rac{\mathrm{d}i/\mathrm{d}t/}{(\mathrm{kA}\cdot\mu\mathrm{s}^{-1})}$
2.16	21.6	4.5	44.3	10.54	67.2	13.5	652	47.4	22	157
1.92	19.2	4.5	44.6	10.54	67.3	12.6	654	47.4	25	157
1.68	16.8	4.5	45.4	10.48	65.3	12.1	665	47.2	28	160
1.47	14.7	4.5	45.4	10.42	66.4	11	667	46.9	32	157
1.32	13.2	4.5	46.3	10.34	64.3	10.1	661	46.5	35	161
1.08	10.8	4.5	48.6	10.35	68	8.88	663	46.6	43	152
0.87	8.7	4.5	50.2	10.07	71.6	10.2	684	45.3	52	141
0.678	6.78	4.5	46	9.71	65.1	13.7	742	43.7	64	149
0.6	6	4.5	47.4	9.71	65.1	13.5	742	43.7	73	149
0.54	5.4	4.5	52.5	9.41	62.7	13.5	765	42.3	78	150
0.46	4.6	4.5	60.3	9.17	63.3	13.4	795.6	41.3	90	145
0.39	3.9	4.5	68	8.62	63	14.1	832	38.8	99	137
0.3	3	4.5	128	8.52	70.5	15.4	829	38.3	128	121
0.24	2.4	4.5	158.4	8.48	95.8	18.6	835	38.2	159	89
0.162	1.62	4.5	196	8.39	130.4	25.9	842	37.8	233	64
0.072	0.72	4.5	221	8.13	222	52.6	857	36.6	508	37
0.057	0.57	4.5	254	8.23	199	96	848	37.0	650	41
0.0474	0.474	4.5	249.7	8.23	202	102	850	37.0	781	41
0.0438	0.438	4.5	263	8.22	197.8	108	869	37.0	845	42
0.0372	0.372	4.5	265	8.19	208.9	119	858	36.9	991	39
0.0312	0.312	4.5	278	8.17	218	133	852	36.8	1178	37
0.0252	0.252	4.5	252	8.16	212	153	874	36.7	1457	38
0.0186	0.186	4.5	251	8.13	203	181	878	36.6	1967	40
0.0126	0.126	4.5	271	7.97	212	276	897	35.9	2846	38
0.0048	0.048	4.5	351	7.78	245	406	955	35.0	7294	32

功率过高时,其 di/dt 受限于饱和、回路等限制,不 再线性上升.另外,当激光峰值功率较低时,开关 延迟时间较大,并随着峰值功率的上升而降低,当 降低到一定程度时,导通延迟时间固定,不再发生 变化.

将开关的输出峰值功率和注入激光功率进行 比较,功率比值随着注入峰值功率的升高而降低, 其与光导开关的非线性模式过渡到线性模式的 特点一致,如图 8 所示,但与光导开关不同,在整 个导通过程中,并不会出现光导开关的非线性模式 的损伤效应.另外,激光峰值功率与开关功率比值 的关系中,呈现一个明显拐点,当注入光功率到达 一定值后,功率比值发生急剧变化,表现出完全不 同的规律特征.



图 7 触发激光峰值功率与开关 di/dt、导通延迟时间的 关系图

Fig. 7. Graph of the relationship between trigger laser peak power and switch di/dt, turn-on delay time.



图 8 注入激光峰值功率与开关输出峰值功率比值关系图 Fig. 8. Graph of the ratio relationship between injected laser peak power and switch output peak power.

2.3 多种工作模式设想及建模仿真

综合研究数据分析,初步设想光控多门极晶闸 管存在多种工作模式,其中注入激光功率与 di/dt 为线性关系,将其称为光致线性导通模式(简称 A 模式), 可获得较高的 di/dt 指标, 其中主要物理 机制为:光照射半导体材料,产生光生载流子,从 而降低器件结构的导通电阻,实现线性导通.而当 注入光功率阈值大幅度降低时,开关功率比值急剧 上升,延迟时间急剧上升,呈现出另一种非线性关 系,将其称为场致非线性导通模式(简称 C 模式), 其可获得更高的功率比值,但其 di/dt 指标显著下 降,其中主要物理机制为:在强电场作用下,载流 子的产生与输运不再与光照射成线性关系,载流子 通过电场获得足够的能量,可以撞击晶格中的原 子,产生新的电子-空穴对,导致器件表现出非线性 特性,其中主要为雪崩倍增效应而非击穿.另外在 这两个模式中间,应该存在一个导通初期符合光致 线性导通规律、导通后期存在场致非线性导通规律 的模式(简称 B 模式),其中主要物理机制为:开关 在导通初期主要依托光生载流子的贡献,使器件快 速开通,当载流子浓度还未降低时,依托电场的加

速作用,发生雪崩倍增效应,从而实现快的开通时间和宽的导通时间,同时伴随有传统晶闸管的正反馈放大过程.多种工作模式的设想及典型特征如图9所示.



图 9 多种工作模式的设想及典型特征



为了探究开关器件的导通特性, 建立了光控 多门极晶闸管的模型, 开展其开通机制研究. 将 对称结构的光控多门极晶闸管, 门极注入波长 1064 nm, 脉宽 10 ns、能量 2 mJ(门极分成 19 点, 每个门极注入约 0.1 mJ)、工作电压 5 kV, 电容 *C* = 42 nF, 电感 *L* = 15 nH 的电路中, 对其进行瞬态 仿真, 并且在关键节点对器件的参数进行观测. 其 中图 10 为对称结构芯片在电路参数中仿真的电流 电压曲线图. 当激光快速注入时, 开关快速导通, 正极电压迅速下降; 当激光注入结束后, 开关正极 电压呈现出上升趋势, 开关的导通过程与注入激光 直接相关, 与实验现象一致.





通过对开关不同时刻的电子浓度仿真计算,开 关的电子浓度在 10 ns 时较高, 而 70 ns 时由于外

物理学报 Acta Phys. Sin. Vol. 74, No. 5 (2025) 058401





Fig. 11. Electron concentration distribution in the optically controlled multi-gate thyristor at 0, 10, and 70 ns in the circuit.

部注入的激光结束,电子浓度在局部位置出现了一 定程度降低,如图 11 所示,说明开关整体导通电 阻出现上升,开关导通过程与激光注入线性相关, 与实验中测试得到的光致线性导通规律一致.

为了分析开关其他的工作模式,改变仿真参数,将对称结构的光控多门极晶闸管接入门极注入 波长 980 nm,脉宽 200 ns、能量 100 μJ(门极分成 19 点,每个门极注入约 5 μJ)、工作电压 5 kV,电 容 *C* = 220 nF,电感 *L* = 800 nH 的电路中,对其 进行瞬态仿真,并且在关键节点对器件的参数进行 观测.其中图 12 为对称结构光控多门极晶闸管在 电路参数中仿真的电流电压曲线图.当激光注入 时,开关快速导通,正极电压迅速下降;随着输出 电流的上升,开关电压出现上升,并伴随时间的延 长,开关电压又出现一定程度的降低,直至电路中 的电容器储能全部释放,与实验现象一致.





Fig. 12. Simulated current voltage curve diagram of an optically controlled multi-gate thyristor.

通过对开关不同时刻的电子浓度仿真计算,开 关的电子浓度在 80 ns 时逐步上升,而 600 ns 时, 激光注入已经完全停止,电子浓度逐步升高,如图 13 所示,说明开关整体导通电阻逐步降低,开关导通 过程与场致载流子倍增相关,开关的导通过程与注 入激光不直接相关,出现与激光不一致的非线性模 式,与实验中测得的场致非线性导通规律一致.

通过两种典型电路的仿真计算分析可知,当注 入激光较强时,可形成快前沿输出特性的光致线性 导通模式;当回路中有较大电容储能时,电压较高, 可形成场致非线性导通模式.将产生两种模式的条 件进行叠加,使两个导通过程连续,在导通初期过 程满足 A 模式特征,在导通后期过程满足 C 模式 特征.

3 开关不同模式的验证与应用

3.1 开关的光致线性模式 (A 模式) 验证

为了结合仿真结果、导通模式的初步设想,进 一步开展验证开关的 A 模式导通特性的验证.采用 23 mm 光控多门极晶闸管芯片,匹配高峰值功率光 源,采用紧凑型低电感回路进行开关的短路测试. 其中电容量选择 8 kV,7 nF 低电感陶瓷电容器进 行并联,构成的 42 nF 与开关形成同轴结构,脉冲 电流探测器置于内部回路,结构如图 14 所示.光控 多门极晶闸管工作在 8.5 mJ 较强激光功率驱动下, 电压 5.2 kV、电流 8.1 kA、开通时间 (10%—90%)为 18.4 ns, d*i*/dt 指标达到 440 kA/μs, 如图 15 所示, 呈现出典型的与激光线性相关的 A 模式导通特性.

物理学报 Acta Phys. Sin. Vol. 74, No. 5 (2025) 058401



图 13 电路中光控多门极晶闸管在 0, 80, 600 ns 时电子浓度分布图

Fig. 13. Electron concentration distribution diagrams of the optically controlled multi-gate thyristor at 0, 80, and 600 ns in the circuit.



图 14 A 模式验证测试结构

Fig. 14. Verification test structure for Mode A.



图 15 A 模式验证测试波形



实验数据 (如表 2 所列) 表明, 激光能量与开 通速度呈正比关系, 当激光低于一定阈值时, 即平 均照射激光功率低于一定阈值时, 器件工作导通模 式发生变化. 激光能量从 0.9—8.5 mJ 变化时, 固 定激光脉宽为 10 ns, 开关的 d*i*/d*t* 随着激光能量 的变大而线性上升, 光控多门极晶闸管进入光致线 性导通模式.

表 2 器件驱动激光能量、短路电流、开通前沿的 关系

Table 2.	The	relationship	between	device	drive
laser energ	gy, she	ort-circuit cur	rent, and	turn-on	edge.

激光 能量/mJ	工作 电压/kV	短路 电流/kA	电流 前沿/ns	电流 脉宽/ns	${ m d}i/{ m d}t \ /({ m kA}{ m \cdot}{ m \mu}{ m s}^{-1})$
0.9	4	1.88	66.8	75.0	28
2.1	4	3.42	40	49.0	86
2.6	4	3.75	36.6	46.0	102
3.6	4	5.65	20.4	36.7	277
4.6	4	5.84	18.8	36.0	311
5.4	4	6.48	18.9	38.0	343
6.3	4	7	18.7	37.7	374
7.4	4	7.3	18.6	38.7	392
8.5	4	7.91	18.6	38.3	425

3.2 开关的场致非线性模式 (C 模式) 验证

为了结合仿真结果、导通模式的初步设想, 进一步开展开关 C模式导通特性的验证.采用 23 mm 光控多门极晶闸管芯片,匹配激光二极管 光源,采用电路进行开关的短路测试.其中电容选 择电压 8.5 kV、容量为 53 nF 的反铁电陶瓷电容 器,脉冲电流探测器置于回路中,结构如图 16 所 示.光控多门极晶闸管工作在能量为 250 μJ、脉宽 为 210 ns 的激光驱动下,电压 8.5 kV、电流 6.0 kA、 开通时间 110 ns, d*i*/dt 指标为 55 kA/μs, 如图 17 所示,呈现出典型的导通过程与电场直接相关的 C模式导通特性.

实验数据 (如表 3 所列) 表明, 当开关电压工 作电压上升时, 导通电流逐渐增加、开通上升时间 不断减小, 相对应的 di/dt 指标逐渐增大.器件在 高工作场强下表现出更优异的性能. 开关的 di/dt 随着电压的增大而线性上升, 光控多门极晶闸管进 入场致非线性导通模式.



图 16 C模式下测试电路 Fig. 16. Test circuit in Mode C.



图 17 C模式下电压电流波形

Fig. 17. Voltage and current waveforms in Mode C.

表 3 不同电压下开关的导通特性 Table 3. The conduction characteristics of the switch at different voltages

		0		
激光 能量/μJ	工作 电压/kV	短路 电流/kA	电流 前沿/ns	$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t / (\mathrm{kA}\cdot\mathrm{\mu s}^{-1})$
200	5.0	2.0	128	16
200	6.0	2.8	121	23
200	7.0	3.9	118	33
200	8.0	5.4	111	49
200	8.5	6.0	110	55

3.3 开关的混合放大模式 (B 模式) 验证

为了进一步验证开关导通初期具有光致线性 导通的 A 模式, 开关导通后期具场致非线性导通 的 C 模式, 且两个模式可以叠加形成混合模式. 采 用 38 mm 直径的光控多门极晶闸管芯片, 匹配高 峰值功率光源, 采用光纤进行耦合馈入, 采用串入 电阻负载的电路进行测试, 其中电容总容量为 20 μF, 回路中电阻为 0.5 Ω, 脉冲电流探测器置于回路中, 结构如图 18 所示. 采用能量 10 mJ、脉冲宽度为 20 ns 的激光功率注入, 驱动峰值功率为 0.5 MW, 开关工作电压为 4.6 kV, 输出电流为 8.5 kA, 脉冲 宽度为 11.9 μs, 电流上升前沿达到 65.7 ns, d*i*/d*t* 指标为 129 kA/μs, 如图 19 所示.



图 18 B模式下测试电路 Fig. 18. Test circuit in Mode B.



图 19 B模式下测试波形 Fig. 19. Test waveform in Mode B.

实验数据表明,当注入激光能量较大、主回路 储能较大,开关可获得快的导通速度、较高的峰值 功率、较长的导通时间.同时满足 A 模式和 C 模式 两种优点,具有混合导通模式 (B 模式) 特征.

3.4 基于不同模式下光控多门极晶闸管的 应用

将光控多门极晶闸管,针对不同的应用场景,进行了封装,结合开关A模式、B模式、C模式的特点,开展了不同场景下的应用.基于小型化高功率光源模块、光纤耦合与23mm芯片串联压接,封装的具有A模式导通特征的15kV,5kA的开关,如图20(a)所示.基于小型化高功率光源模块、光纤耦合与50mm芯片压接,封装的具有B模式导通特征的8kV,40kA的开关,如图20(b)所示.基于LD光源、23mm芯片一体化封装,具有C模式导通特征的8kV,5kA的开关,如图20(c)所示.

在完成封装的开关基础上,基于具有 A 模式 导通特性,具有快前沿、窄脉冲的特点的器件,开 展了氢闸流管替代验证,初步实现了全固态化的加



图 20 基于不同模式特征完成的 3 种封装 (a) A 模式特征器件封装; (b) B 模式特征器件封装; (c) C 模式特征器件封装 Fig. 20. Three packages based on different mode characteristics: (a) Mode A characteristic device package; (b) Mode B characteristic device package; (c) Mode C characteristic device package.



图 21 基于开关的多模式特征研制的器件开展的典型应用验证 (a) 多路同步固态起爆器应用; (b) KDP 光开关驱动脉冲源应用 Fig. 21. Typical application verification of devices developed based on multi-mode switch characteristics: (a) Multi-channel synchronous solid-state initiator application; (b) KDP optical switch drive pulse source application.

速器脉冲电源;基于具有 B 模式导通特性,既满足 快前沿,也兼顾宽脉宽特点的器件,将其应用于 KDP 光开关的驱动中,初步实现了高平定度的脉 冲驱动源;基于具有 C 模式导通特性,满足小体 积、宽脉宽特点的器件,将其应用于大电流起爆中, 实现了多路同步固态起爆器、脉冲源如图 21 所示.

4 讨 论

光控多门极晶闸管在不同的光注入条件下,体 现出不同的导通特性.结合典型电路下不同激光注 入参数下的对比实验、对光控多门极晶闸管及注入 参数进行建模仿真、开展不同典型电路结构下的 模式验证,确认了开关在不同的光注入和电路结 构下,表现出不同的导通模式,并可应用于不同的 场合.

 在 A 模式时,注入激光能量为 8.5 mJ、脉 宽为 10 ns,峰值功率为 0.85 MW 条件下,电压工作 在 5.2 kV、输出电流 8.1 kA、开通时间 (10%—90%) 为 18.4 ns, d*i*/d*t* 指标达到 440 kA/μs,其主要表 现特征为开关的 d*i*/d*t* 与注入激光能量线性相关, 可实现快前沿的输出,体现出光致线性导通模式, 该种模式适合用于高功率、窄脉冲、快前沿的应用 场景,如高功率微波功率源等,特性与气体开关近似.

2) 在 C 模式时,设置触发激光能量为 250 μJ, 脉宽为 210 ns,峰值功率为 1200 W 条件下,开关 工作电压 8.5 kV,短路电流达到 6 kA,电流上升 前沿达到 110 ns, d*i*/dt 指标超过 55 kA/μs.其主 要表现特征为开关的 d*i*/dt 与注入激光能量不线 性相关,与施加在开关两端的电场线性相关,可实 现大电流宽脉宽的工作特性,体现出场致非线性导 通模式.该种模式适合用于高功率、宽脉冲、较慢 前沿的应用场景,如大电流起爆、电磁驱动等,特 性与引燃管、触发光近似.

3) 在 B 模式时, 设置触发激光能量为 10 mJ, 脉宽为 20 ns, 峰值功率为 0.5 MW 条件下, 开关 工作电压 4.6 kV, 短路电流达到 8.5 kA, 电流上升 前沿达到 66 ns, d*i*/dt 指标超过 129 kA/µs. 其主 要表现特征为开关导通前期满足光致线性导通模 式、开关导通后期体现出场致非线性导通模式, 既 满足了快前沿输出特性、也兼顾了大电流宽脉宽的 工作特性, 体现出混合的导通模式. 该种模式适合 用于高功率、宽脉宽的应用场景,如加速器电源等, 特性与氢闸流管、伪火花开关近似.

5 结 论

本文研究的新型光控多门极晶闸管结构,既保 留了光导开关较快的导通速度和较高的隔离电压 特性,又延续了晶闸管的高峰值功率与宽脉宽导通 特性. 本研究中针对性提出了开关具有多种工作模 式的设想,并通过对比实验、建模仿真、实验验证 等方法进行了验证,发现并证实了开关具有3种工 作模式,分别为光致线性模式(A模式)、场致非线 性模式 (C模式)、混合放大模式 (B模式), 3种模 式各具有特点,可形成不同类型的器件.A模式主 要依赖于高功率激光注入时快速产生的光生载流 子机制作用; C 模式主要依赖于载流子通过电场获 得的正反馈放大及雪崩倍增效应; B 模式主要将光 致线性模式和场致非线性模式的机制在一个导通 周期时间内进行了结合,导通过程实现了连续.在 此认识的基础上,根据开关不同导通模式的特点, 封装了多种器件模块,并开展了不同的应用验证. 研究结果表明,该开关可部分替代传统气体开关, 具有良好的应用与发展前景.

感谢电子科技大学集成电路学院陈万军教授和刘超副 教授在仿真方面的讨论和帮助.

参考文献

- Liu X S 2005 High Pulsed Power Technology (Beijing: National Defense Industry Press) p367 (in Chinese) [刘锡三 2005 高功率脉冲技术 (北京: 国防工业出版社) 第 367 页]
- [2] Zhou Q H, Dong Z W, Jian G Z, Zhou H J 2015 Acta Phys. Sin. 64 205206 (in Chinese) [周前红, 董志伟, 简贵胄, 周海京 2015 物理学报 64 205206]
- [3] Shi W, Tian L Q, Wang X M, Xu M, Ma D M, Zhou L J, Liu H W, Xie W P 2009 Acta Phys. Sin. 58 1219 (in Chinese) [施 卫, 田立强, 王馨梅, 徐鸣, 马德明, 周良骥, 刘宏伟, 谢卫平 2009 物理学报 58 1219]
- [4] Wang G T, Liu X X 2010 Acta Phys. Sin. 59 1964 (in Chinese) [王公堂, 刘秀喜 2010 物理学报 59 1964]

- [5] Loquai S, Bölting M, Kellner U, Fischer J, Poisel H 2015 The 24th International Conference on Plastic Optical Fibers Nuremberg, Germany, September 22-24, 2015 p193
- [6] Wang L Y 2018 M. S. Dissertation (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [王 凌云 2018 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [7] Wang C L, Gao Y, Ma L, Zhang C L, Kim E, Kim S 2005 *Acta Phys. Sin.* 54 2296 (in Chinese) [王彩琳, 高勇, 马丽, 张 昌利, 金垠东, 金相喆 2005 物理学报 54 2296]
- [8] Wang Y N, Ren L Y, Yang Z H, Shen S K, Deng Z C, Yuan Q, Ding W D, Ding Z J 2024 *High Volt.* 9 2
- [9] Liu B L, Liu D Z, Luo Y F, Tang Y, Wang B 2013 Acta Phys. Sin. 62 057202 (in Chinese) [刘宾礼, 刘德志, 罗毅飞, 唐 勇, 汪波 2013 物理学报 62 057202]
- [10] Sanders H, Glidden S, Dunham C 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC) San Diego, CA, USA, June 3–7, 2012 p335
- [11] Waldron J, Brandmier K 2017 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) Atlantic City, NJ, USA, May 21–25, 2017 p1
- [12] Waldron J , Brandmier K , Temple V 2015 Pulsed Power Conference. IEEE Austin, Texas, USA, May 31–June 4, 2015 p7296986
- [13] Chen W J, Liu C, Shi Y J, Liu Y W, Hong T, Liu C F, Zhou Q, Li Z J, Zhang B 2017 *IEEE Trans. Electron Dev.* 64 4206
- [14] He D Z, Sun W J, Liao Y X, Zhang P H, Yu L, Dong S L, Yao C G, Liu X 2023 *High Volt.* 8 698
- [15] M Junaid, Yu W Q, Cao S Z, Yu X L, Yu D S, Zong W L, Wang J H 2023 *High Volt.* 8 1275
- [16] Yuan X L, Zhang H D, Xu Z F, Ding Z J, Yu J G, Hao Q S, Zeng B, Hu L 2010 *Res. Prog. SSE* **30** 64 (in Chinese) [袁雪 林, 张洪德, 徐哲峰, 丁臻捷, 俞建国, 浩庆松, 曾搏, 胡龙 2010 固体电子学研究与进展 **30** 64]
- [17] Rukin S N 2020 Rev. Sci. Instrum. 91 011501
- [18] Tian L Q, Pan C, Shi W, Pan Y K, Ran E Z, Li C X 2023
 Acta Phys. Sin. 72 178101 (in Chinese) [田立强, 潘璁, 施卫, 潘艺柯, 冉恩泽, 李存霞 2023 物理学报 72 178101]
- [19] Gui H M, Shi W 2018 Acta Phys. Sin. 67 184207 (in Chinese)
 [桂淮濛, 施卫 2018 物理学报 67 184207]
- [20] Hong W, Liang L, Yu Y H 2012 Acta Phys. Sin. 61 058501 (in Chinese) [洪武, 梁琳, 余岳辉 2012 物理学报 61 058501]
- [21] Mi Y, Wan J L, Bian C H, Yao C G, Li C X 2017 Trans. China Electrotech. Soc. 32 244 (in Chinese) [米彦, 万佳仑, 卞 昌浩, 姚陈果, 李成祥 2017 电工技术学报 32 244]
- [22] Rodin P, Ivanov M 2020 J. Appl. Phys. 127 044504
- [23] Liang L, Yan X X, Huang X Y, Qing Z H, Yang Z W, Shang H 2022 Proc. CSEE 42 8631 (in Chinese) [梁琳, 颜小雪, 黄鑫 远, 卿正恒, 杨泽伟, 尚海 2022 中国电机工程学报 42 8631]
- [24] Lyublinsky A G, Korotkov S V, Aristov Y V, Korotkov D A 2013 IEEE Trans. Plasma Sci. 41 2625
- [25] Wang L Y, Liu H W, Yuan J Q, Xie W P, Yan J S 2024 Trans. China Electrotech. Soc. 39 7566 (in Chinese) [王凌云, 刘宏伟, 袁建强, 谢卫平, 颜家圣 2024 电工技术学报 39 7566]

Various operating modes of optically controlled multi-gate thyristors^{*}

WANG Lingyun^{1)2)†} LIU Hongwei²⁾ YUAN Jianqiang²⁾ XIE Weiping²⁾ LUAN Chongbiao²⁾ LI Hongtao²⁾ ZHANG Jiande¹⁾ CHEN Yi²⁾ HE Yang²⁾ LIU Xiaoli³⁾ GAO Bin⁴⁾

1) (College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

3) (Hubei TECH Semiconductors Co., Ltd., Xiangyang 441000, China)

4) (Sichuan Research Center of Quality Safety and High Voltage Engineering Technology, Mianyang 621900, China)

(Received 19 November 2024; revised manuscript received 10 January 2025)

Abstract

In order to meet the switching requirements of high-frequency pulsed-power systems and further enhance the peak power and turn-on speed of solid-state switches, comparative experiments on the structure of optically controlled multi-gate thyristors and the parameter of injected light are investigated in this work. The research results show that semiconductor chips based on the multi-gate thyristor structure exhibit different conduction characteristics under varying laser injection conditions, resulting in unique inflection point curves. By establishing a switching model and changing the injected light parameters and circuit parameter models, three conceptual operating modes for the optically controlled multi-gate thyristor are proposed, they being photonic linear mode (Mode A), field-induced nonlinear mode (Mode C), and hybrid amplification mode (Mode B).

Based on these concepts, the experimental validation tests are conducted, and the three distinct operating characteristics of the optically controlled multi-gate thyristor are confirmed. In Mode A, the conduction process is mainly related to the injected light power parameters, which is similar to the scenario in the linear mode of traditional light-guided switches, thus Mode A is suitable for the narrow pulse width applications. Mode C mainly focuses on carrier multiplication after injection, resembling the conduction characteristics of super thyristors (SGTO), and this mode is suitable for wide pulse width and high current applications. In Mode B, its initial conduction is related to the injected light parameters, while the later carrier multiplication continues from the earlier photonic linear mode, achieving characteristics of both fast rise time and wide pulse width, effectively integrating the advantages of light-guided switches and SGTOs.

In Mode A, when injected laser energy is 8.5 mJ, a pulse width is 10 ns, and peak power is 0.85 MW, the switch operates at a voltage of 5.2 kV, an output current of 8.1 kA, turn-on time (10%–90%) of 18.4 ns, with a di/dt value reaching 440 kA/µs. The main characteristic is that the di/dt of the switch is linearly related to the injected laser energy, thereby achieving a fast rise time output, which reflects the photonic linear conduction mode. This mode is suitable for high-power, narrow-pulse, and fast-rise-time applications, such as high-power microwave sources, and its characteristics are similar to those of gas switches.

In Mode C, when triggering laser energy is set to $250 \ \mu$ J, a pulse width is 210 ns, and peak power is 1200 W, the switch operates at a voltage of 8.5 kV, a short-circuit current of 6 kA and a current rise time of 110 ns,

^{*} Project supported by the Equipment Development Pre-research Fund, China (Grant No. 614260501030117) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51807185).

[†] Corresponding author. E-mail: 101kpa@sina.com

achieving a di/dt value exceeding 55 kA/µs. The key characteristic is that the di/dt of the switch is unrelated to the injected laser energy but is related to the electric field applied across the switch, thus it can operates at large current and wide pulse width, which reflects the field-induced nonlinear conduction mode. This mode is suitable for high-power, wide-pulse, and slower-rise-time applications, such as large current detonation and electromagnetic drives, and its characteristics are similar to those of igniter tubes and triggered light.

In Mode B, when triggering laser energy is set to 10 mJ, a pulse width is 20 ns, and peak power is 0.5 MW, the switch operates at a voltage of 4.6 kV, with a short-circuit current reaching 8.5 kA and a current rise time of 66 ns, achieving a di/dt value exceeding 129 kA/µs. The main characteristic is that the initial conduction of the switch satisfies the photonic linear conduction mode, while the later conduction exhibits the field-induced nonlinear conduction mode, thus achieving both fast-rise-time output and the capability for large current and wide pulse width, reflecting a hybrid conduction mode. This mode is suitable for high-power and wide-pulse applications, such as accelerator power supplies, its characteristics are similar to those of hydrogen thyratrons and pseudo-spark switches.

The discovery and validation of multiple operating modes for the switch significantly enhance the di/dt and peak power of power semiconductor switching devices, laying a theoretical and experimental foundation for the development of semiconductor switches with ultra-high peak power. Additionally, the switching devices are packaged according to their different operating modes and have been used in accelerator power supplies, solidstate detonators, and high-stability pulse drive sources, achieving positive results.

Keywords: pulsed power, optically controlled switch, multi-mode, turn-on speed

PACS: 84.30.Jc, 85.30.-z, 42.65.Pc, 52.38.Kd

DOI: 10.7498/aps.74.20241608

CSTR: 32037.14.aps.74.20241608

物理学报Acta Physica Sinica





Institute of Physics, CAS

光控多门极晶闸管的多种工作模式

王凌云 刘宏伟 袁建强 谢卫平 栾崇彪 李洪涛 张建德 谌怡 何决 刘小俐 高彬

Various operating modes of optically controlled multi-gate thyristors WANG Lingyun LIU Hongwei YUAN Jianqiang XIE Weiping LUAN Chongbiao LI Hongtao ZHANG Jiande CHEN Yi HE Yang LIU Xiaoli GAO Bin 引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 058401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241608

CSTR: 32037.14.aps.74.20241608 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20241608

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多模式离子推力器输入参数设计及工作特性研究

Design of input parameters and operating characteristics for multi-mode ion thruster 物理学报. 2022, 71(7): 075203 https://doi.org/10.7498/aps.71.20212045

多模式离子推力器放电室和栅极设计及其性能实验研究

Design and performance test of discharge chamber and grid for multi-mode ion thrusters 物理学报. 2022, 71(19): 195203 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220720

自旋偏压驱动的硅烯和锗烯光控晶体管

Optically controlled silicene and germanene transistors driven by spin-bias 物理学报. 2022, 71(19): 198502 https://doi.org/10.7498/aps.71.20221047

基于平凹多通腔的非线性脉冲压缩技术

Nonlinear pulse compression technique based on in multi-pass plano-cancave cavity 物理学报. 2024, 73(12): 124206 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240110

基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band 物理学报. 2021, 70(18): 188701 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210897

外部光注人的光泵浦自旋垂直腔表面发射激光器中的两个混沌偏振分量对两个复杂形状目标中的多区域精确测距

Precise ranging for the multi regions of two complex-shape targets by using two chaotic polarization components in the optically pumped spin vertical cavity surface emitting laser with optical injection

物理学报. 2021, 70(7): 074206 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201693