



华安证券
HUAAN SECURITIES

证券研究报告

可控核聚变行业专题：
核聚变“黑马”FRC，关注半导体开关产业趋势

华安证券研究所

张志邦 (SAC职业证书号S0010523120004) zhangzhibang@hazq.com

王璐 (SAC职业证书号S0010525040001) wanglu1@hazq.com

2025年7月23日

投资建议

FRC核聚变有望首先实现商业化，电源系统是FRC稳定运行的关键，半导体开关是大势所趋

- **短期：**诺瓦聚变、星能玄光、瀚海聚能等选择FRC技术路径的国内核聚变创业公司加速成立，投融资需求增加，相关真空开关、电容等核心零部件率先受益。相关标的包括旭光电子、国光电气、王子新材、胜业电气等。
- **长期：**Helion作为预计全球最早实现聚变发电销售的商业化公司（预计2028年给微软提供50MW聚变发电），其技术特色在于FRC路线+磁能回收系统，有助于大幅提升聚变发电效率、降低成本，Helion的路径选择或代表核聚变快速实现商业化落地的重要方向。Helion创始人指出其最核心的两个电力电子部件为高压电容、半导体芯片。根据彭先觉院士等人发布的论文，长远来看，半导体开关具有较高的寿命和可靠性，是用于大型驱动器的大势所趋。相关标的包括宏微科技、赛晶科技等。
- **投资逻辑：**在国内聚变产业投资景气上行期，优选技术领先、绑定核心客户的零部件厂商；同时兼顾短期项目进展节奏与长期新技术方向。

风险提示：可控核聚变项目商业化进展节奏不及预期的风险；半导体开关性能参数不及预期的风险；技术路径变化的风险。



为什么关注可控核聚变**FRC**（Field-reversed Configuration, 场反位）路径？



中美两国主要FRC核聚变项目梳理

中美两国科研院所均重视可控核聚变FRC技术路径，中国FRC聚变商业化公司加速追赶

美国

科研院所

- 01 洛斯阿拉莫国家实验室 *FRX*
- 02 普林斯顿等离子体物理实验室 *PFRC-2*

商业化公司

- 01 Helion Energy *Polaris (北极星)*
- 02 TAE *Norm*
- 03 PFS (Princeton Fusion Systems) *PFRC*

中国

科研院所

- 01 中国工程物理研究院流体物理研究所 *荧光-1*
- 02 中国科学技术大学 *KMAX*
- 03 华中科技大学 *HFRC*

商业化公司

- 01 星能玄光 *Xeonova-1*
- 02 瀚海聚能 *HHMAX-901*
- 03 新奥科技 *EFRC-0*
- 04 诺瓦聚变 (预计)

.....

FRC核聚变路径造价低，有望率先实现商业化

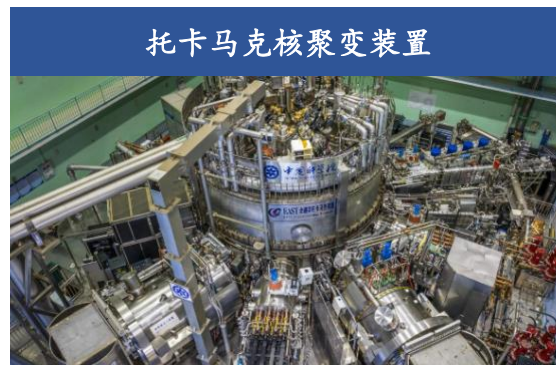
FRC作为核聚变领域的“黑马”，系统结构简单、造价及运行成本低，有望率先实现商业化

- **FRC结构简单、造价低：**FRC不需要像托卡马克一样多的磁体来保持等离子体的约束和稳定，FRC等离子体自主形成内部磁场，降低对外部磁体需求，所以FRC装置对于磁体部件的需求下降，也就意味着基于FRC路径的聚变装置的结构可以更简洁和紧凑，体积更小，进而可以大幅降低制造成本，也使得FRC装置更易于实现商业化。
- **高 β 值，聚变功率输出更高：**FRC等离子体的 β 值（等离子体压力/磁场压力）比托卡马克高，高 β 值意味着FRC可以用小于托卡马克的磁场强度约束住同样体积或密度的等离子体。TAE指出在同样磁场强度和等离子体体积的情况下，FRC聚变装置可以得到的聚变输出功率是传统托卡马克的100倍以上。
- **可以实现能量回收，提高发电效率：**场反位聚变的独特属性是等离子体 β 值高，场反位等离子体 β 接近100%。相比之下，托卡马克等离子体平均 β 为5%或更低。高 β 值意味着更方便直接从等离子体中进行能量回收，进而提高发电效率。

TAE Technology的FRC核聚变装置



托卡马克核聚变装置





基于FRC路径的核聚变创业公司数量增加，市场投资增加

FRC路径成为近期国内新成立核聚变创业公司的主流选择



瀚海聚能：成立于 2022 年，核心成员来自中国科学技术大学等离子体物理与聚变工程专业以及清华大学工程物理专业，与核工业西南物理研究院签订技术合作协议，开始装置设计工作。2025年4月，瀚海聚能装置通过生态环境部定级申请。2025年7月18日，瀚海聚能HHMAX-901主机成功点亮，开启商业聚变发展里程碑。



星能玄光：成立于2024年3月，由孙玄教授创立，核心团队来自中国科学技术大学核学院。核心技术基于孙玄教授十余年前提出的先进场反磁镜聚变路径。自2013年起，该技术已在中国科学技术大学的KMAX-FRC课题组进行实践和开发。2024年11月公司获得亿元天使轮融资。2025年2月，Xeonova-1成功实现放电，从设备进场安装到实现放电，耗时不足两个月。



诺瓦聚变能源（预计）：诺瓦聚变能源科技（上海）有限公司成立于2025年04月03日。预计以FRC作为商业化核聚变路径选择。



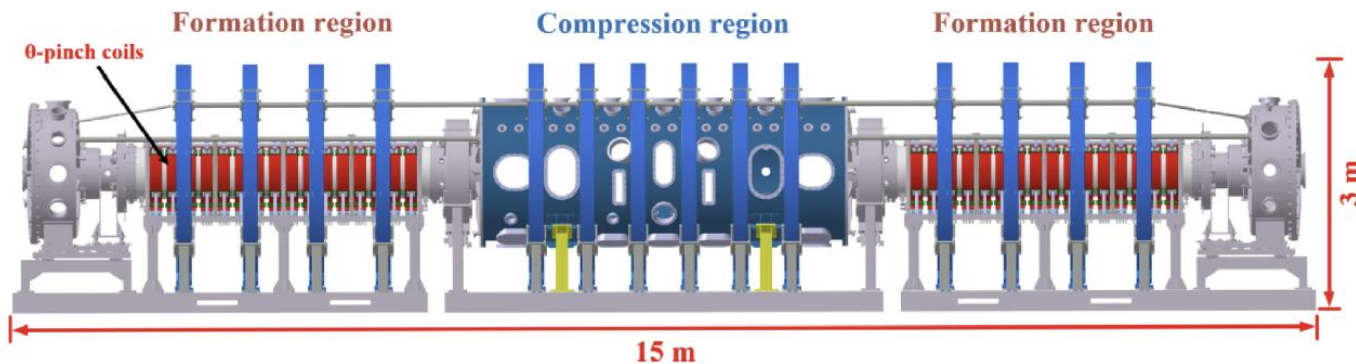
为什么在**FRC**装置中更关注电源系统？

电源系统是FRC稳定运行的关键

θ -pinch：FRC核聚变反应的关键在于使用 θ -pinch线圈产生FRC等离子体

- 在FRC核聚变装置中，**最核心**的是使用 θ -pinch线圈在装置两端产生“初始等离子体”，然后这些等离子体会被喷射到装置中间，发生碰撞，合并形成新的“FRC等离子体”。因此， θ -pinch线圈在等离子体的形成过程中起到至关重要的作用。
- 我们以华中科技大学建设的HFRC实验装置为例，它包括两端的两个“形成区”和中间的一个“压缩区”。“初始等离子体”在形成区产生，然后被喷射到压缩区进行碰撞、合并和磁压缩。

HFRC装置示意图，该装置长15m、高3m、宽2.5m



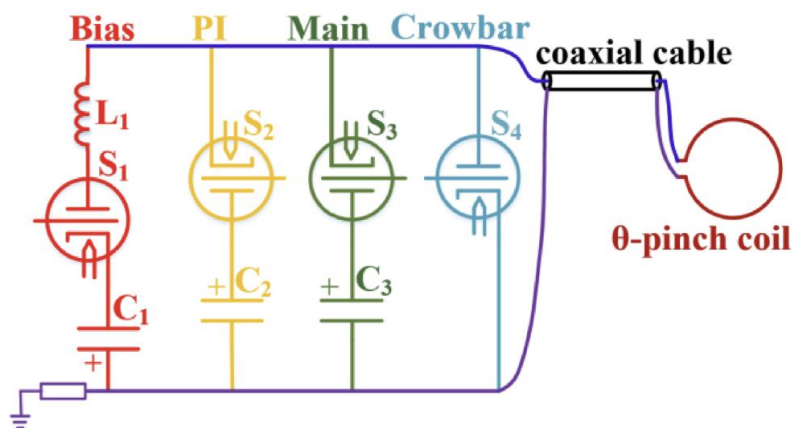


电源系统是FRC稳定运行的关键

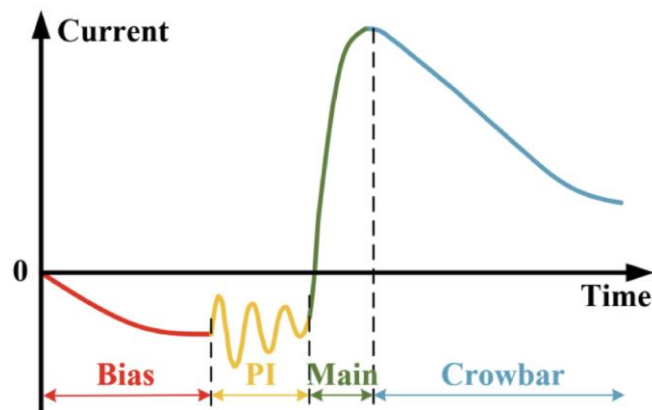
θ -pinch电源：给 θ -pinch线圈供电的高压脉冲电源能否精准放电，决定了等离子体参数的高低

- 因为FRC等离子体的形成和喷射是高度动态化的，所以给 θ -pinch线圈提供电能的高压脉冲电源的精准放电控制的重要性不言而喻。
- 高压脉冲电源由4个分支组成，即Bias、PI、Main、Crowbar，每个分支对应一个放电阶段，对应等离子体不同的状态，它们依次放电以产生电流，给 θ -pinch线圈供电，并分别由S1-S4开关控制。

高压脉冲电源的构成



4个分支依次放电产生电流





电源系统是FRC稳定运行的关键

θ -pinch电源：给 θ -pinch线圈供电的高压脉冲电源能否精准放电，决定了等离子体参数的高低

- 首先是**Bias**阶段，第一阶段放电（在HFRC装置中大约几十 μs ），产生使等离子体可发生初始电离的**Bias**磁场。
- 然后进入**PI**阶段，在第二个阶段的放电，会产生更大的振动频率，进而给初始等离子体提供更好的电离环境。
- 此后进入**Main**阶段，第三个阶段放电，磁场会在几 μm 中快速反转，磁场线重新连接并形成一個封闭的磁场面，该阶段产生FRC等离子体。然后，FRC等离子体会被轴向加速并喷射到中间的腔室进行碰撞和磁压缩。
- 最后是**Crowbar**阶段，第四个阶段放电，主要是用来延长FRC等离子体的持续时间。

HFRC高压脉冲电源的设计参数

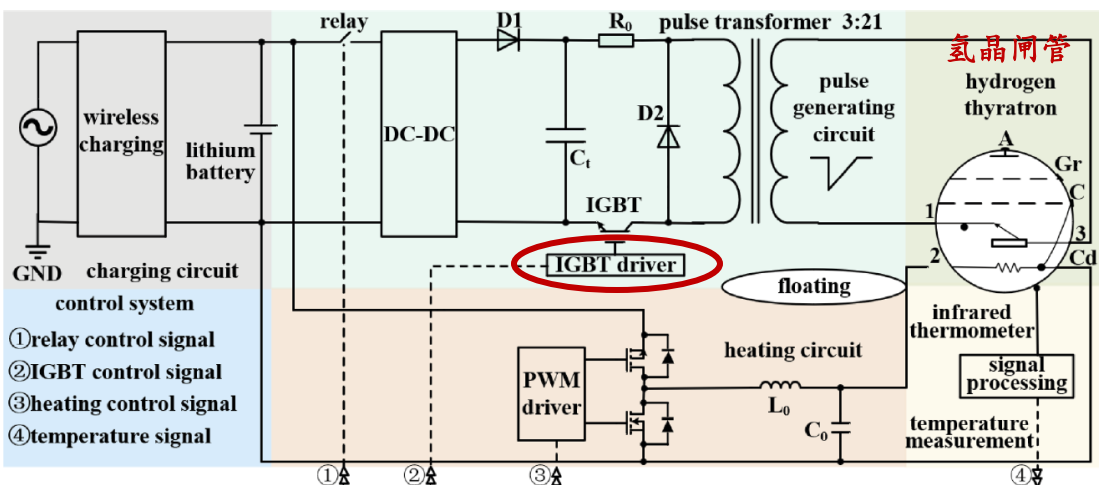
设计参数	Bias	PI	Main
预充电电压 (kV)	-24	40	40
电容 (μF)	54.1	0.85	8
振动频率 (kHz)	5	150	62.5

开关技术直接决定放电效率、间接影响商业化可行性

脉冲电源开关&开关触发器：高压脉冲电源顺序放电的精确控制，取决于开关的精准触发

- 由于 θ -pinch电源系统的开关在瞬时状态下需要承受高电压（高达几十kV）和高电流（高达上百kA），因此HFRC实验装置的脉冲电源开关目前选用的是具有耐高压和高电流能力的TDI氢晶闸管，并设计了基于IGBT的脉冲开关触发器。

HFRC脉冲电源开关触发器构成



HFRC脉冲电源开关所选TDI氢晶闸管

	类型	参数
S1	TDI1-50k/50H	50kV/50kA
S2	TDI4-100k/75H	75kV/100kA
S3	TDI4-100k/150H	150kV/100kA
S4	TDI4-150k/50H	50kV/200kA

资料来源：Design of High Voltage Pulsed Power Supply for HFRC, 2020, 华安证券研究所

资料来源：Improvement and test of high-voltage pulsed power supply for HFRC, 2022, 华安证券研究所

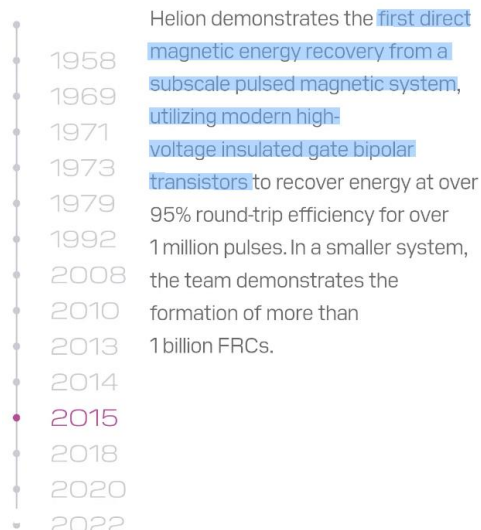


Helion采用直接磁能回收技术，验证电子电力器件技术可行性

直接磁能回收：低成本实现聚变发电的关键，适用于FRC等离子体高 β 值的特性

- 直接磁能回收原理：等离子体 β 值越高，体内压力越高，高 β 等离子体随着聚变的发生而膨胀，足够强时可以反推外部磁场，从而产生电流，实现从聚变过程直接回收电力，可以直接省略蒸汽发电阶段，是低成本实现商业化聚变发电的关键。
- Helion在2015年使用IGBT首次实现了直接磁能回收。其创始人David Kirtley在2024年7月公开表示Helion脉冲聚变核心依靠两个电子器件：高压电容和半导体芯片。2025年1月Helion再获4.25亿美元投资后，David再次提到公司会以更快的速度建设电容、磁体和半导体器件。

2015年Helion首次实现磁能回收



资料来源：Helion官网，华安证券研究所

2024及2025年Helion公开表示重要电力电子器件



David Kirtley
Founder and CEO of Helion Energy

Helion's pulsed fusion approach hinges on two key types of power electronics: high-voltage capacitors and power semiconductors.

资料来源：领英，华安证券研究所

Today we're sharing news of our oversubscribed and upsized \$425 million **fundraise!**

I am very excited for what this funding will enable for us. We will be radically scaling up our manufacturing in the U.S. – enabling us to build capacitors, magnets, and semiconductors much faster than we have been able to before. This accelerates the construction of the world's first fusion power plant and then all our plants to come.

资料来源：Helion官网，华安证券研究所



行业趋势：半导体开关用于大型驱动器是新产业方向

重复频率长寿命的初级功率源技术是大型驱动器技术的关键点

- 驱动器的重复频率运行能力和寿命潜力取决于开关器件及其同步触发技术。
- 目前来看，基于低气压放电机理的气体开关（氩闸流管、伪火花开关和BLT）在重复频率长寿命性能方面具有潜力，但不足之处在于“个性较强”，即每个开关由于个体差异导致触发控制条件不同，想要精确同步，每个开关都需配置独立的触发控制系统，这就导致整个触发控制系统较为庞杂。
- 长远来看，半导体开关器件用于大型驱动器是大势所趋，主要系半导体开关器件具有较高的寿命和可靠性。目前半导体开关的问题在于功率容量低、电流上升速率低且相对价格高，但由于半导体开关技术发展较快，且有降本趋势，半导体开关或将在价格和性能上有优势。

	气体开关	半导体开关
产品	氩闸流管、伪火花开关、BLT等	IGBT开关等
优势	目前性能参数达标	1、高可靠性、高寿命 2、双向开关，可用于磁能回收
劣势	1、开关触发时序控制问题：每个开关由于个体差异导致触发控制条件不同，想要精确同步，每个开关都需配置独立的触发控制系统，这就导致整个触发控制系统较为庞杂 2、使用寿命低于半导体开关 3、单向开关	目前性能参数暂时未达到要求（功率容量低、电流上升速率低），需要定制研发
目前应用	目前用于脉冲电源	目前用于背景电源、脉冲电源开关触发器
行业趋势	长远看半导体开关是大势所趋；若考虑磁能回收则需使用半导体开关；Helion已开始布局	



产业链相关标的

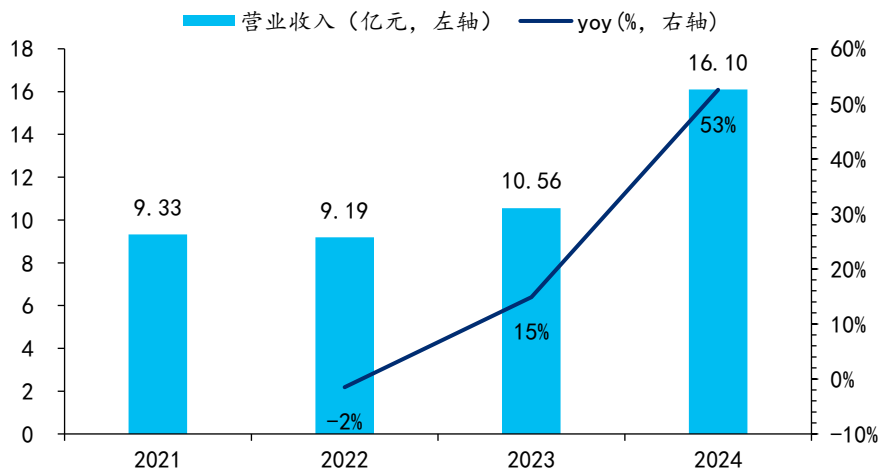


赛晶科技（0580.HK）：脉冲电源开关获美国聚变公司TAE订单

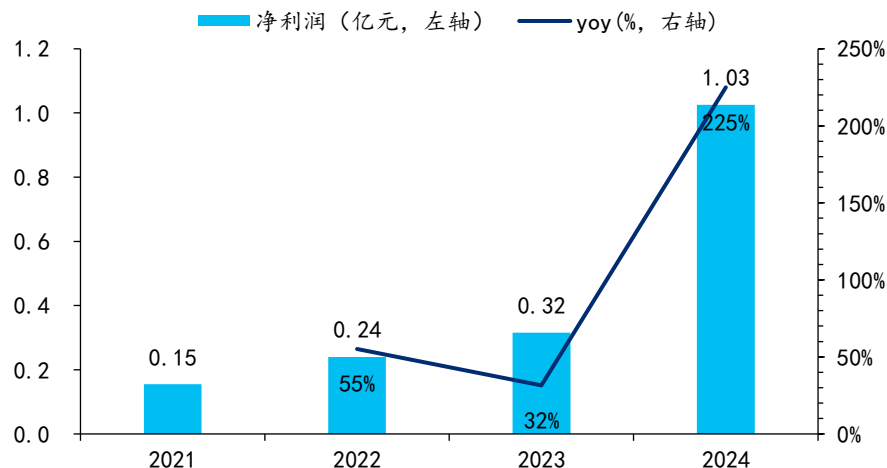
2022年向美国聚变公司TAE提供脉冲电源开关基于晶闸管，目前公司的聚变脉冲电源开关基于IGBT

- 赛晶科技是业内领先的电力电子器件供应商和系统集成商。公司成立于2002年，2010年在香港主板上市(股票代码 0580.HK)。公司专注于两大高端技术领域：功率半导体及配套器件技术、电力系统创新技术。
- 瑞士Astrol电子有限公司是赛晶科技集团的子公司，成立于1996年，是欧洲著名的电力电子固态开关专业设计、制造供应商，为瑞士ABB半导体设计和配套电力电子组件。后来ABB半导体负责高功率电力电子开关的部门分离出来并入了Astrol，Astrol传承了ABB半导体在相关大功率电力电子开关领域的多年积累和沉淀。在高压大功率领域，拥有业内技术领先的全固态直流断路器、固态交流开关和高功率脉冲技术。

赛晶科技2021-2024年营收及增速



赛晶科技2021-2024年归母净利润及增速





赛晶科技（0580.HK）：脉冲电源开关获美国聚变公司TAE订单

2022年向美国聚变公司TAE提供脉冲电源开关基于晶闸管，目前公司的聚变脉冲电源开关基于IGBT

- 2022年赛晶科技子公司——瑞士Astrol公司的脉冲电源产品再获可控核聚变研发新订单。向一家可控核聚变技术领先的美国公司，提供高压、高 di/dt 的脉冲电源用于其一项新型可控核聚变反应堆的研发。该项目，将先期建立一个测试平台，并有望于2023年开始建设一个规模更大的反应堆。Astrol公司提供的脉冲电源产品，将全部由Astrol公司自行设计和集成。其中，采用了一款独特 di/dt 的门极换流晶闸管（GCT）为核心器件，并集成了Astrol公司自主研发的驱动器，从而实现了极强的脉冲电流和非常快的开关速度。

赛晶科技向美国TAE可控核聚变项目提供脉冲功率开关

02 美国TriAlpha的可控核聚变试验



开关1

- 6kV /6kA 半桥结构
- 100kJ 电容放电，提供20~30 ms电流脉冲

开关2

- $2 \times 4.5\text{kV}$, $\pm 6\text{kA}$ 全桥结构
- 100kJ 电容放电，提供微秒级电流脉冲



赛晶科技（0580.HK）：脉冲电源开关获美国聚变公司TAE订单

2022年向美国聚变公司TAE提供脉冲电源开关基于晶闸管，目前公司的聚变脉冲电源开关基于IGBT

固态功率开关

Astrol 的固态功率开关在高功率范围内，电压高达 **100kV**，额定电流可扩展，通常在数十甚至数百 **kA**的范围内。此外，它们是全固态的，这意味着它们可以在没有任何活动部件的情况下切换大电流。电流由半导体元件接通和关闭，这些元件串联以实现所需的额定电压，在某些情况下并联以实现比单个元件更高的额定电流。

- 公司的固态功率开关基于晶闸管和/或 IGBT 功率半导体技术。该设计通常是定制的，基于标准化的构建块，这些构建块以无数种可能的组合组合而成。
- 固态电源开关是机械和真空开关的替代品，非常适合需要快速、频繁和无电弧开关的环境。
- 应用领域：聚变能源、铁路、电网、医疗等

公司某款20kV功率开关产品参数

20kV 开关 AA-10375-008 腋术规范

参数	符号	备注	最小值	典型值	最大值	单位
工作电压	V	100FIT	-	-	25	kV _{DC}
脉冲电流	I	单脉冲 (10us)	-	-	50	kA
电流上升率	di/dt		-	-	30	kA/us
反向漏电流	I _{leak}		-	-	10	mA
串联级数	n		-	8	-	pcs
冷却系统	-	水冷			50	l/min
工作温度			5	-	60	°C
储存温度			-25	-	85	°C
逻辑供电	V _{logic}		48	48	72	V _{DC}



赛晶科技（0580.HK）：脉冲电源开关获美国聚变公司TAE订单

2022年向美国聚变公司TAE提供脉冲电源开关基于晶闸管，目前公司的聚变脉冲电源开关基于IGBT

聚变应用中的 Astrol 脉冲电源开关

这是一款基于IGBT的脉冲开关，公司的这款IGBT开关可用于聚变电源系统的多个领域，包括等离子体加热和控制、磁约束以及功率转换和分配。

- **超快 IGBT（绝缘栅双极晶体管）**：公司将 IGBT 等半导体器件用于电力电子应用。结合了 MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管）的优点和双极晶体管的高电流能力。超快 IGBT 的开关速度（器件打开和关闭所需的时间）针对快速运行进行了优化。
- **高速运行**：超高速 IGBT 使断路器能够在微秒内响应短路事件。最大限度地减少对系统运行的影响。
- **高电流处理能力**：IGBT 可以处理大电流。使其适用于涉及大量电力的聚变电系统。
- **可靠性**：基于 IGBT 的断路器具备高可靠性和长寿命，可确保聚变发电系统的持续安全运行。

公司产品应用领域

电网



智能电网的保护涉及基于硬件和软件的解决方案的结合，包括保护装置和高级监控，以确保安全高效的运行。

可控核聚变



释放地球上的太阳能。通过核聚变提供清洁和无限的电力。比传统资源更安全、更环保的替代品。由我们基于 IGBT 的超快速直流断路器保护。

铁路



直流解决方案正在彻底改变铁路网络。高效可靠的直流电子元件，可实现铁路车辆的最佳性能。改变铁路运输的未来。

船舶



智能直流电网通过利用固态直流断路器增强船舶电气系统。它们提高了效率、可靠性和安全性，整合了可再生能源并提供了简化的控制。

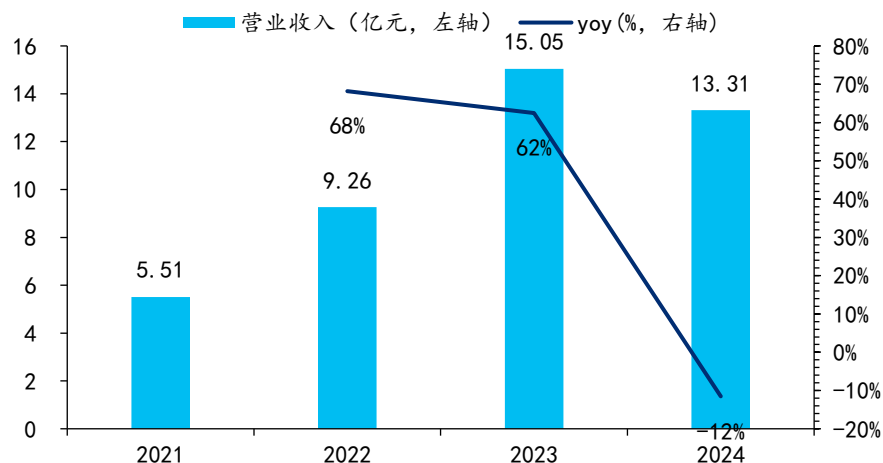


宏微科技（688711.SH）：国内半导体功率器件领军企业之一

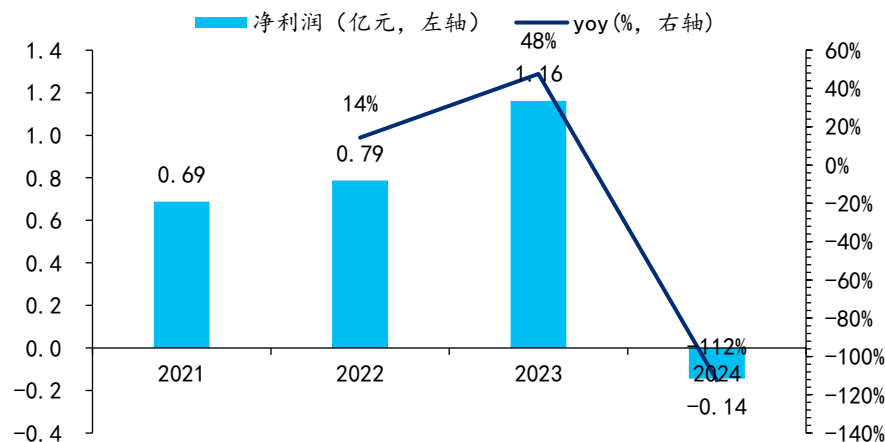
与合肥综合性国家科学中心合作攻克功率器件技术难题，2025年业绩有望扭亏为盈

- 宏微科技是国内功率半导体器件行业领军企业之一。成立于2006年，主营业务为功率半导体器件的设计、研发、制造及销售，主要产品包括 IGBT、MOSFET、FRD、SiC 等芯片、分立器件、模块等功率半导体器件。公司自产 IGBT、FRD、SiC 芯片技术已达国际先进、国内领先水平，打破国外垄断，填补了多项国内空白。
- 2025年6月，合肥综合性国家科学中心能源研究院与宏微科技进行“功率器件可靠性评测方法和寿命预测联合实验室”签约，共同攻克我国功率器件行业发展的关键技术难题。

宏微科技2021-2024年营收及增速



宏微科技2021-2024年归母净利润及增速



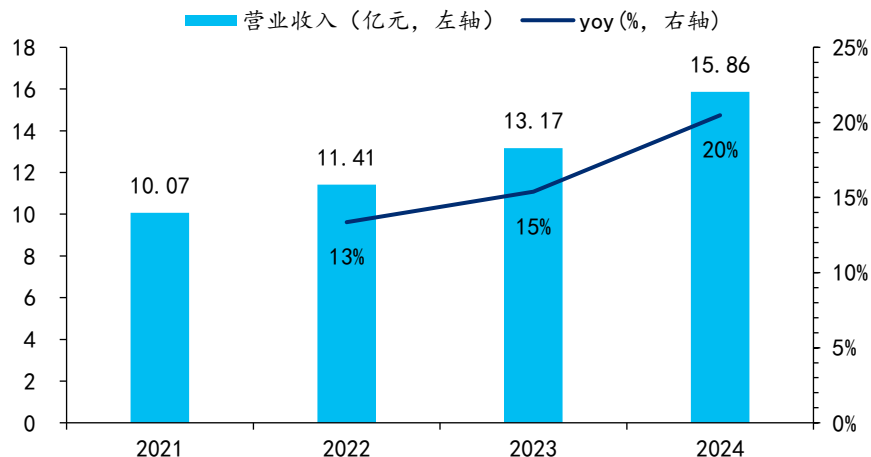


旭光电子（600353.SH）：真空开关设备国内领先企业

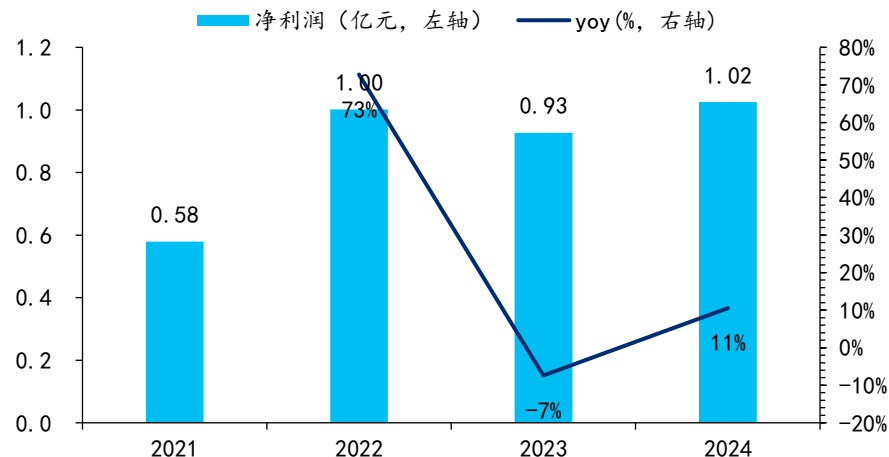
真空开关设备国内领先企业，与国内直线型核聚变公司瀚海聚能进行战略合作

- 成都旭光电子股份有限公司，前身国营旭光电子管厂，1965年创建于四川广元。历经50余年，公司以真空开关设备、电真空器件、电子陶瓷材料、智能控制快速开关、专业设备制造等多元化的研发、生产制造、销售为主业，涉及电子管、真空灭弧室、固封极柱、高低压成套配电装置、直流输配电以及电子陶瓷、电子工业专业设备和动力能源制造、金属零件精密铸造、嵌入式计算机等领域。
- 2025年7月，旭光电子受邀参加中国首座直线型核聚变装置点亮仪式。点亮仪式上，旭光电子与瀚海聚能（成都）科技有限公司于现场完成了战略合作签约。双方一致同意，将在技术研发、聚变领域商业化发展等方面展开深度合作，共同开拓市场新机遇。

旭光电子2021-2024年营收及增速



旭光电子2021-2024年归母净利润及增速





风险提示

- 1、可控核聚变项目商业化进展节奏不及预期的风险。
- 2、半导体开关性能参数不及预期的风险。
- 3、技术路径变化的风险。



重要声明

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的执业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

免责声明

华安证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。本报告中的信息均来源于合规渠道，华安证券研究所力求准确、可靠，但对这些信息的准确性及完整性均不做任何保证。在任何情况下，本报告中的信息或表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。华安证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

本报告仅向特定客户传送，未经华安证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。如欲引用或转载本文内容，务必联络华安证券研究所研究并获获得许可，并需注明出处为华安证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。如未经本公司授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。本公司并保留追究其法律责任的权利。

投资评级说明

以本报告发布之日起6个月内，证券（或行业指数）相对于同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准，A股以沪深300指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克指数或标普500指数为基准。定义如下：

行业评级体系

增持—未来6个月的投资收益率领先市场基准指数5%以上；

中性—未来6个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；

减持—未来6个月的投资收益率落后市场基准指数5%以上；

公司评级体系

买入—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数15%以上；

增持—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数5%至15%；

中性—未来6-12个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；

减持—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数5%至15%；

卖出—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数15%以上；

无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。