



48V 处理器供电技术

仅限PMIC会员单位内部使用，不得外传

陈烨楠 博士

“科创百人”研究员

浙江大学 杭州国际科创中心 先进半导体研究院

2022-10-26



学习经历

- 2006-2010 学士
 - 竺可桢学院/电气工程学院，浙江大学
- 2010-2018 博士
 - 电气工程学院，浙江大学
 - 导师：徐德鸿教授
 - 课题：软开关光伏逆变器

工作经历

- 2018-2021 博士后研究员
 - 普林斯顿大学
 - 合作PI：陈敏杰教授
 - 课题：数据中心供电架构，48-V VRM，软体机器人驱动
- 2021.11- “科创百人” 研究员
 - 浙江大学 杭州国际科创中心 先进半导体研究院
- 2021.06- 校内兼聘研究员
 - 浙江大学 电气工程学院



先进半导体研究院简介



Power Management Innovation Consortium



- 围绕国家里大战略需求和浙江省战略性新兴产业发展布局
- 以宽禁带半导体材料、功率芯片和射频芯片的研发与产业化为核心
- 以封装测试和应用技术作为服务支撑
- 整合浙江大学电气学院、材料学院、信电学院以及上下游相关企业力量
- 由杨德仁院士担任首席科学家，郑有料院士担任学术委员会主任，盛况教授担任院长
- 获批浙江省宽禁带功率半导体材料与器件重点实验室，国内唯一的全链条开放式宽禁带半导体材料、器件及应用创新高能级科研平台



地理位置





封装测试超净间

- 总面积约2240平方米，包含封装测试区、黄光区、干法灰区等功率芯片全生产线实验区。其中，超净区总占地面积约850平方米
- 区域设备包含银烧结炉、全自动贴片机、全自动点胶机、激光打标机、切筋压力机、注塑机、粗铝线键合机、金丝球焊机、高温真空炉等



应用测试实验室

- 总面积约500平方米，包含仿真设计区、高压大功率实验区、焊接区、及电路调试区等
- 具备回收式电网模拟电源、可编程直流电源、大功率交流负载等多种电源负载、具有红外热像仪、高带宽示波器等各类测试仪器



EMC测试区与屏蔽室

- 独立的EMC测试实验区与屏蔽室，包含人工电源网络、三相周波跌落发生器、雷击浪涌实验台、静电放电实验台、电磁屏蔽室等设备设施，能够进行全面完整的EMI与EMS测试

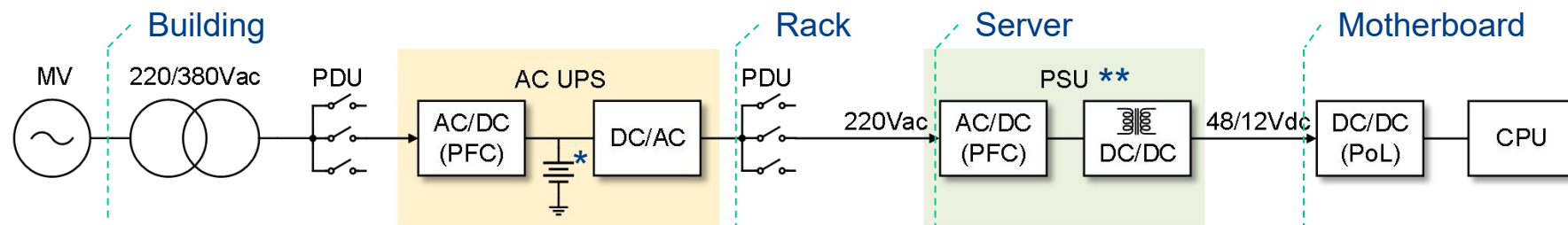
- 4000至5000 亿度 $\approx$ 全球总耗电量的2%（2020年估算）
- 碳排放约为2.5至3.1亿吨 $\approx$ 全球总排放量的1%
- 我国数据中心年耗电量约2000 亿度

仅限PMIC会员单位内部使用，不得外传

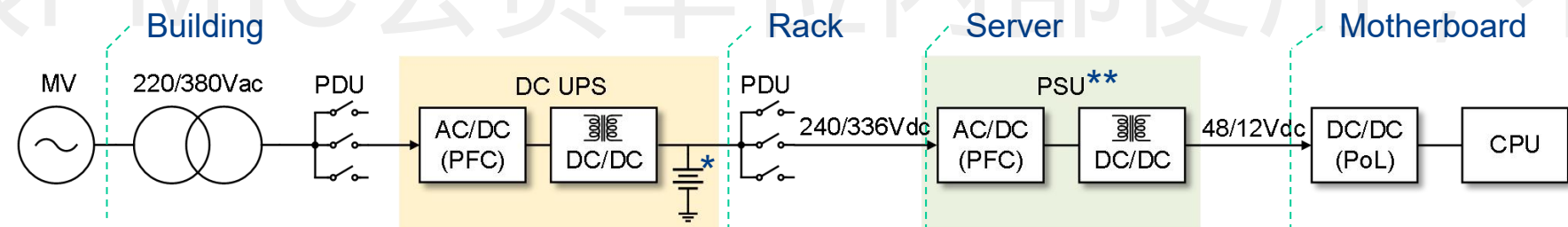
“推动5G、大数据中心等新兴领域能效提升”

——十四五规划和2035年远景目标纲要

• AC UPS Architecture



• HVDC UPS Architecture

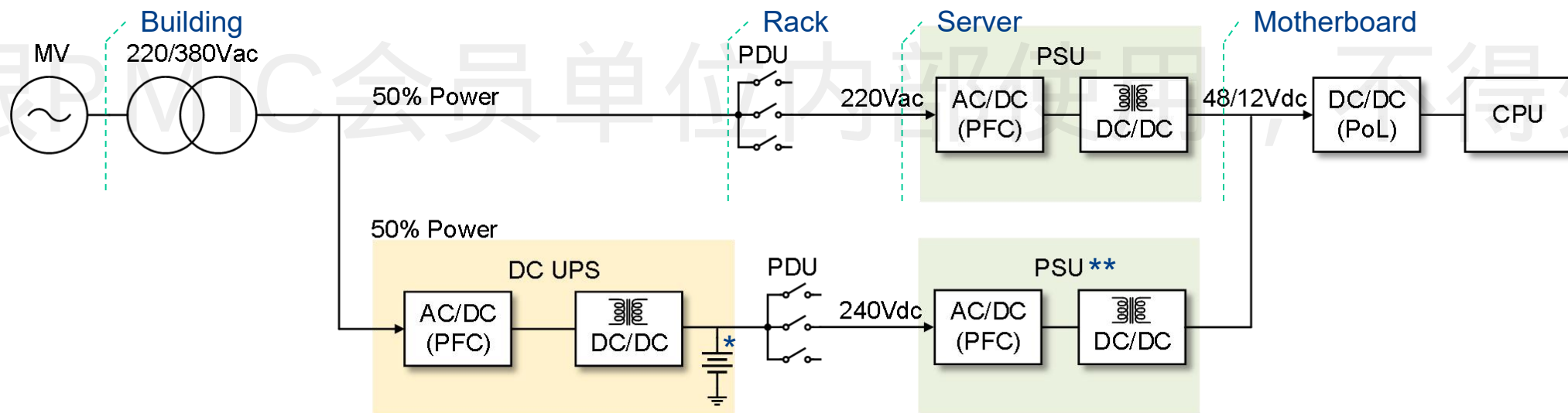


转换级数多



* 后备电池单元可能包括一个dc/dc变换器
** 服务器兼容交流和直流输入

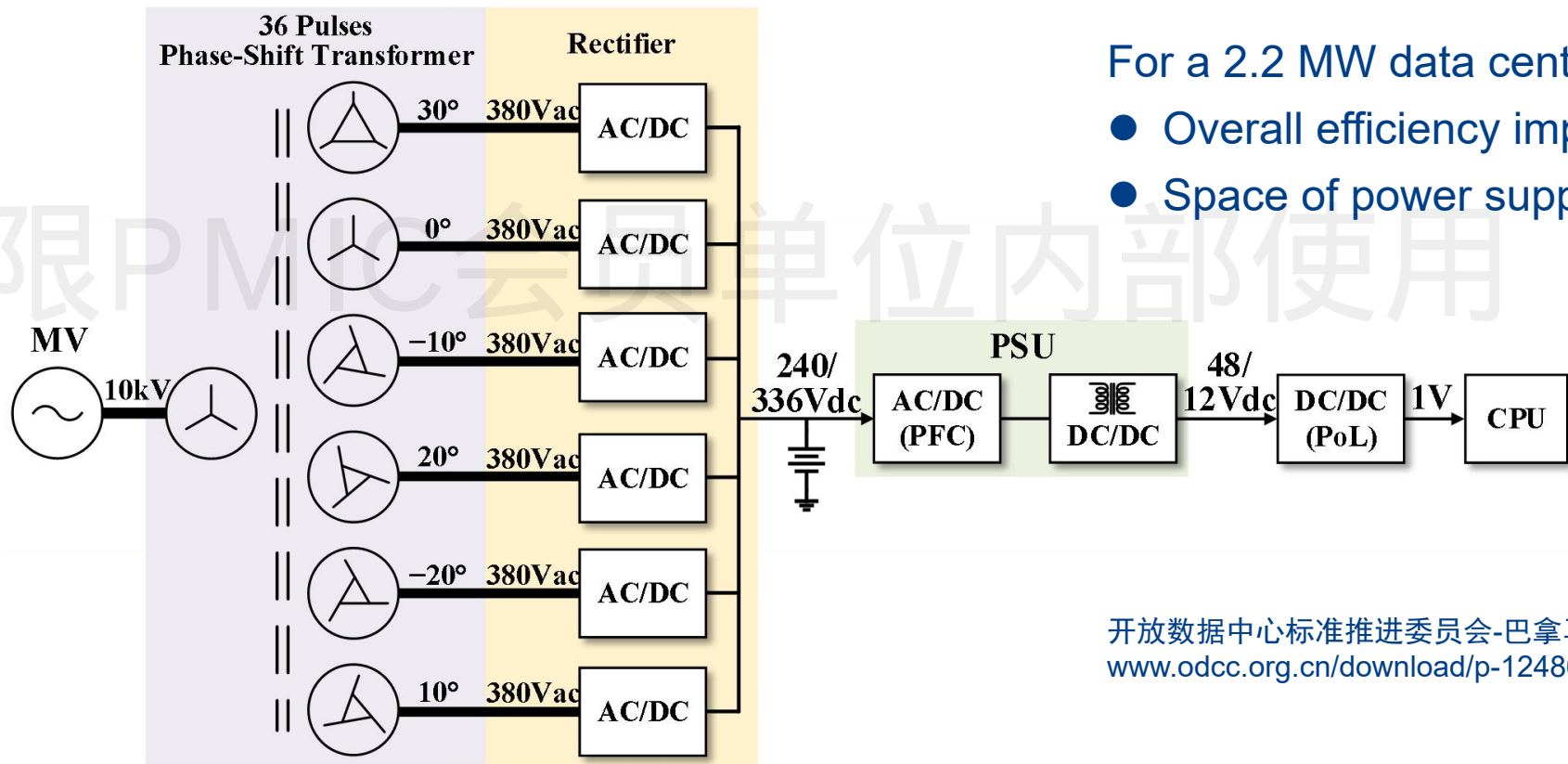
- 双路并联
 - 效率改善、节省AC UPS成本
 - AC输入没有UPS，可靠性会降低



* 后备电池单元可能包括一个dc/dc变换器

** 服务器兼容交流和直流输入

- 10kV 至 直流母线效率提升，无需PFC



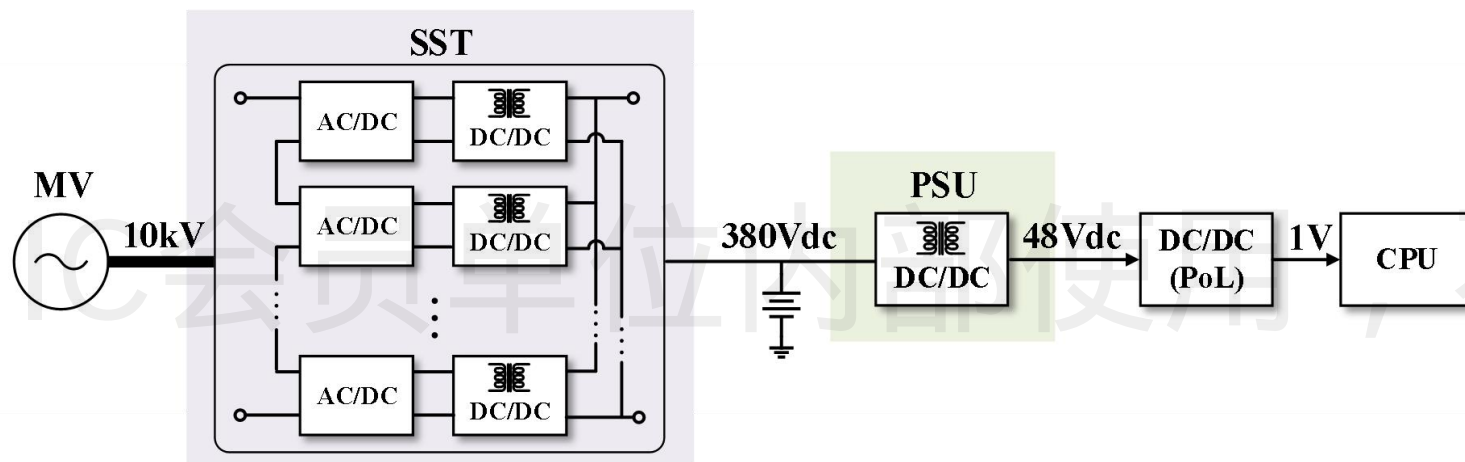
For a 2.2 MW data center

- Overall efficiency improved by 2.5%
- Space of power supply reduced by 60%

开放数据中心标准推进委员会-巴拿马供电技术白皮书
www.odcc.org.cn/download/p-1248609053405745154.html



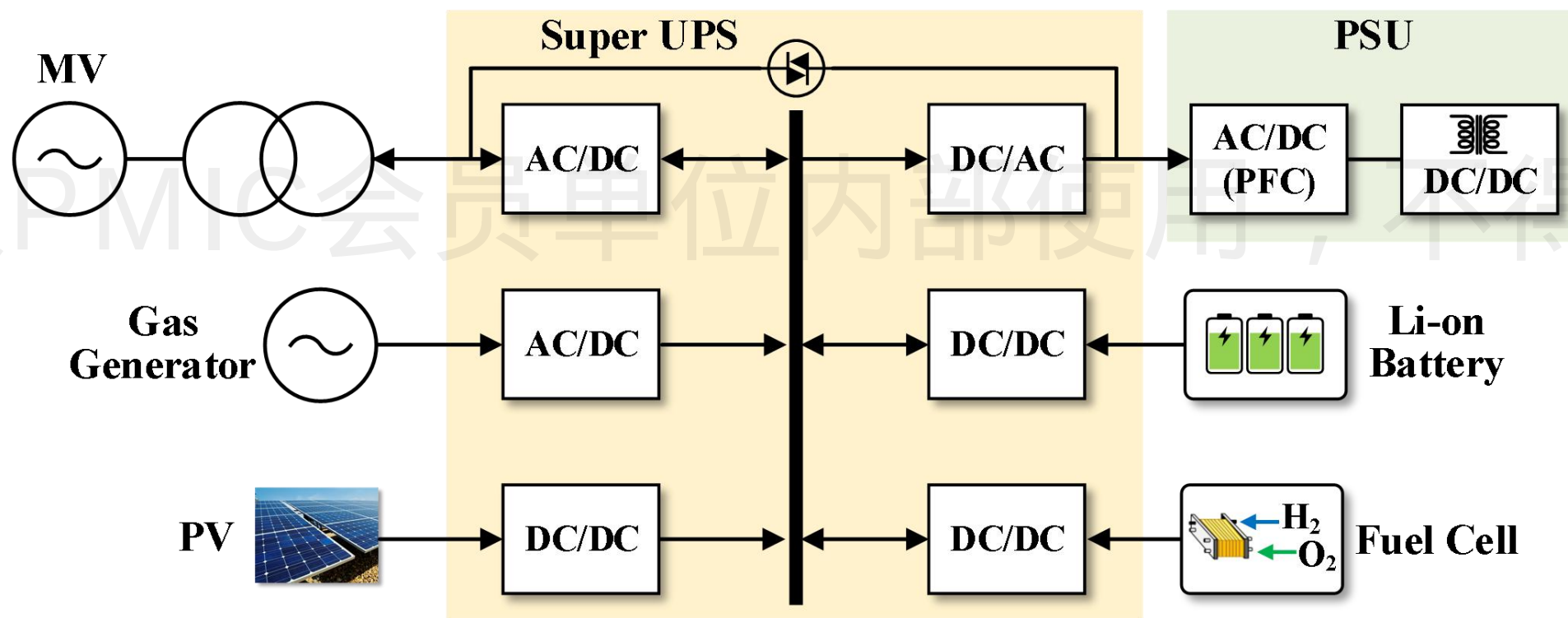
- 工频 vs 中频/高频变压器
- 铜铁 vs 硅
- 高功率密度



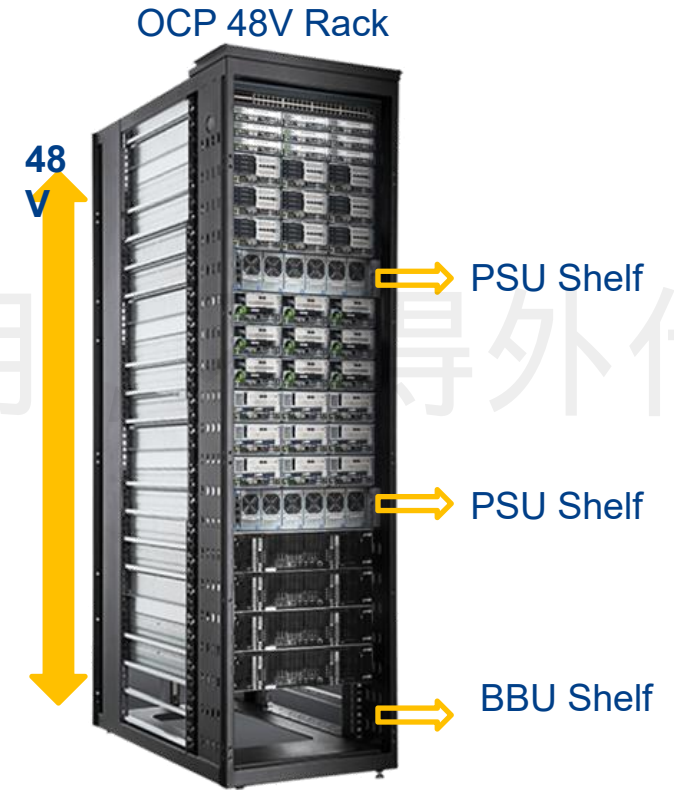
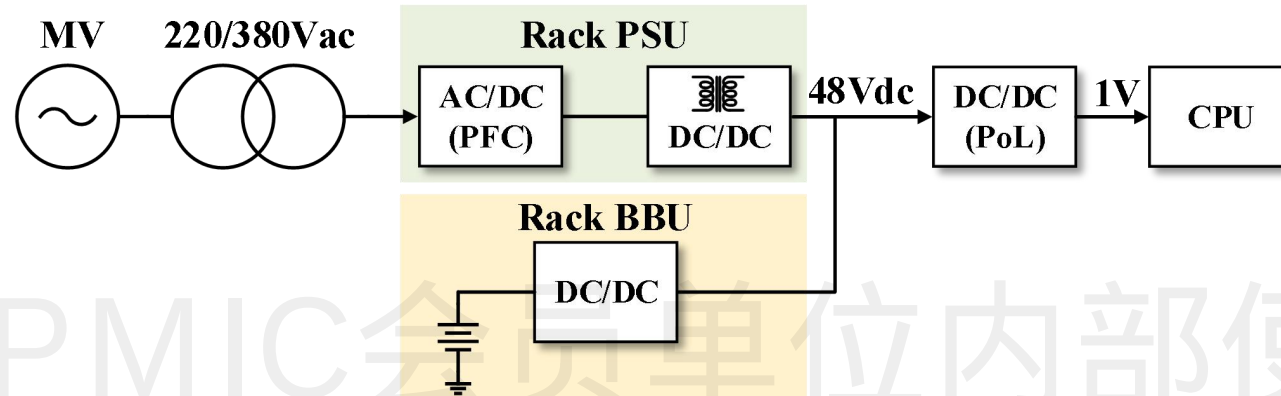
S. Zhao, Q. Li, F. C. Lee and B. Li, "High-Frequency Transformer Design for Modular Power Conversion From Medium-Voltage AC to 400 VDC," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 9, pp. 7545-7557, Sept. 2018.

D. Rothmund, T. Guillod, D. Bortis and J. W. Kolar, "99% Efficient 10 kV SiC-Based 7 kV/400 V DC Transformer for Future Data Centers," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 7, no. 2, pp. 753-767, June 2019.

- 多能源接入：高可靠性
- 可再生能源：碳中和



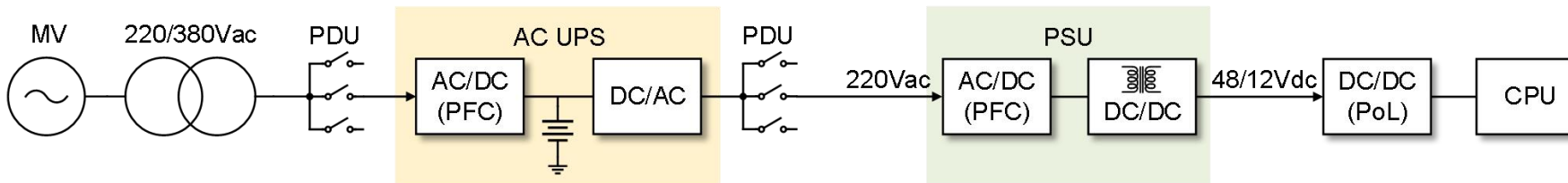
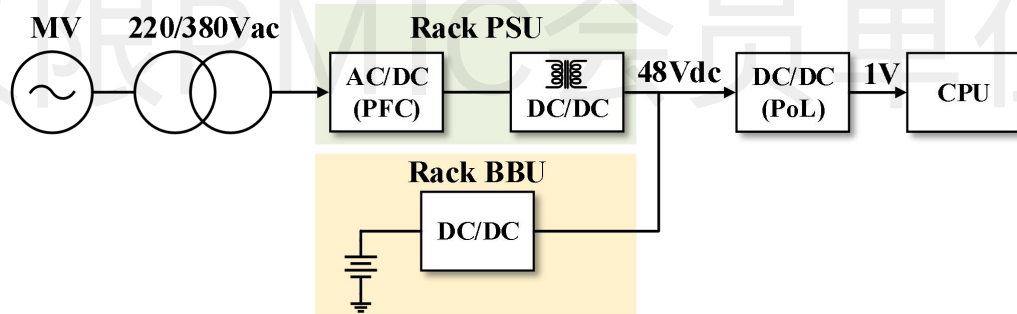
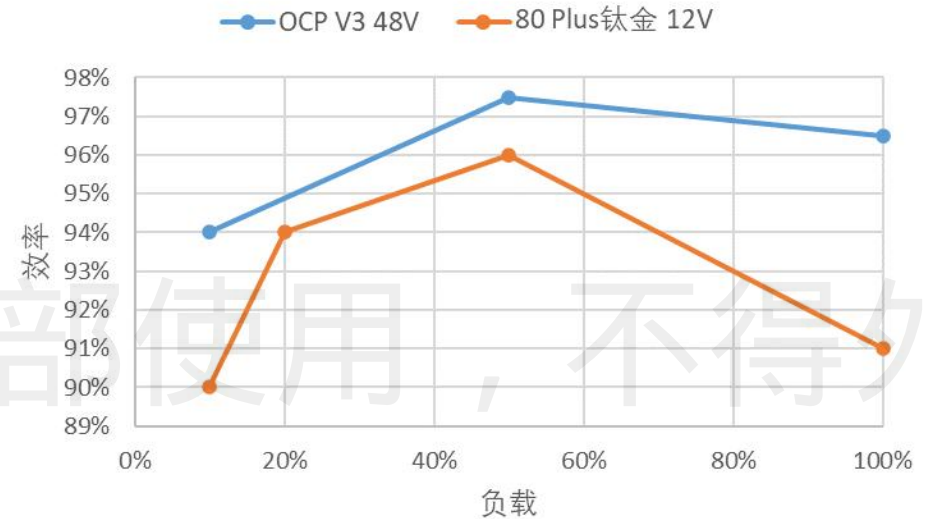
- 48V DC Architecture from Open Computing Project (OCP)



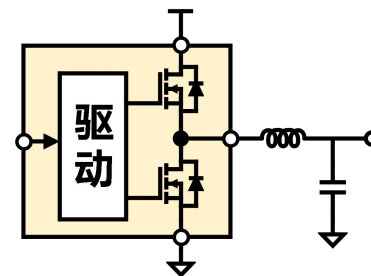
- 功率变换级数减少
- 电池靠近服务器，可靠性增强
- 48V母线损耗低
- 需要高降压比PoL

“Google 48V Rack Adaptation and Onboard Power Technology Update”, 2019 OCP Global Summit

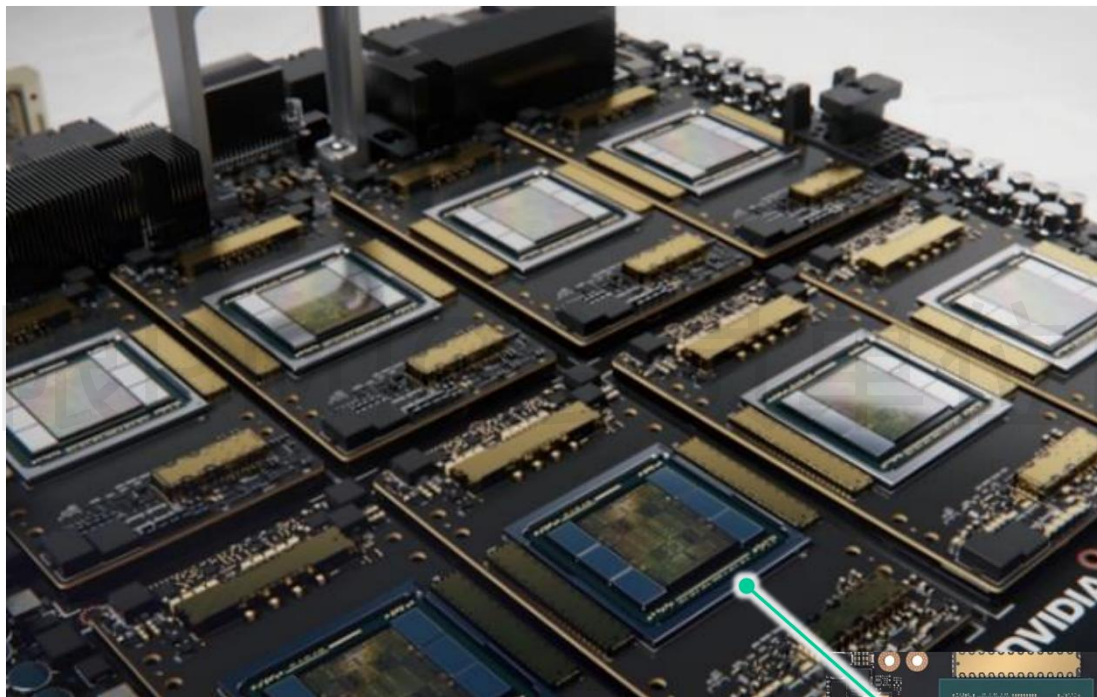
- 母线损耗降低1/16, 10kW Rack母线电流: 48V / 208A vs 12V / 833A
- 提升PSU效率: 400V转48V vs 400V转12V
- 挑战: PoL降压比增大



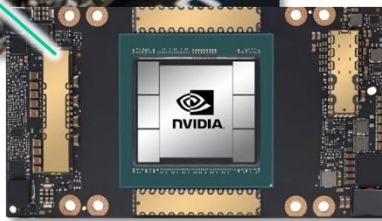
- 多相Buck（DrMOS），结构简单、控制方案成熟
- 12V转1V：极限占空比，器件利用率低，不适用于48V输入
- 输出电感
 - 直流偏置过高，体积较大
 - 小电感：高 di/dt ，响应速度快
 - 大电感：低纹波，导通损耗小
 - 无法靠提升 f_s 来解决这一矛盾



电感



Nvidia Tesla A100
400 W, 1 V, 400 A

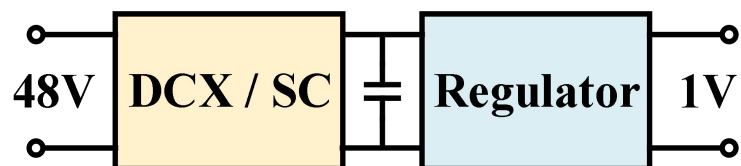


挑战

- 高降压比 (48:1)
- 大电流 ($> 1000 \text{ A/core}$)
- 高动态 ($> 1000 \text{ A}/\mu\text{s}$)
- 高功率密度 ($> 1 \text{ A}/\text{mm}^2$)
- 高效率

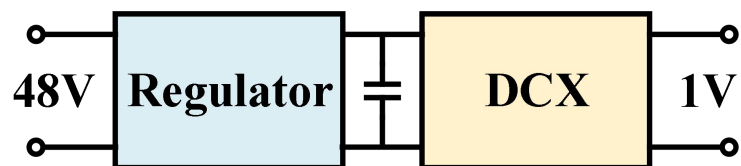
动态响应 $>$ 功率密度 $>$ 效率

- 后级调压IBA (Intermediate Bus Architecutre)



- ☺ 最为常见，中间母线电压通常为12V
- ☺ 快速迁移，直接利用12V Buck电路及控制方案
- ☹ 仍存在12V Buck 方案的缺点：窄脉冲、器件利用率低、输出电感直流偏置高
- ☹ 前级增加额外的损耗和体积

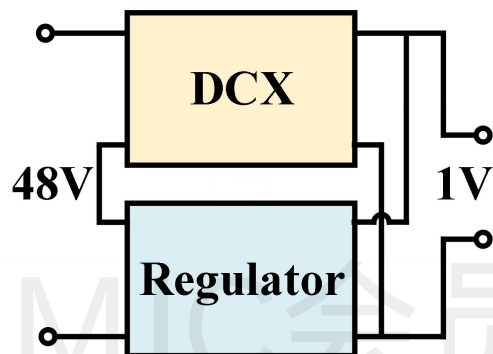
- 前级调压IBA



- ☺ 调压移至高压侧，电感直流偏置降低、体积小
- ☹ 控制对象更复杂
- ☹ 响应速度慢

前后两级传递全部能量！

- 串并联型



- 😊 两级只传递部分能量、器件应力低、效率较高
- 😞 负载调节能力有限
- 😞 控制对象更复杂

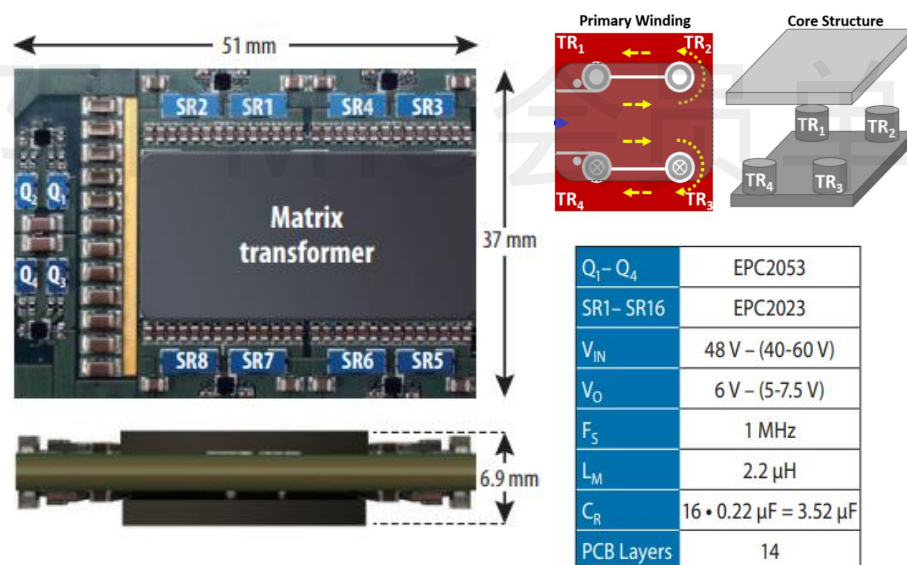
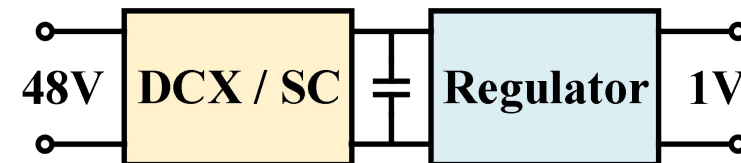
- 单级型



- 😊 电路比较简单（变压器+Current Doubler 或 Hybrid-Switched-Cap）
- 😞 控制对象更复杂
- 😞 最大占空比限制，影响动态响应

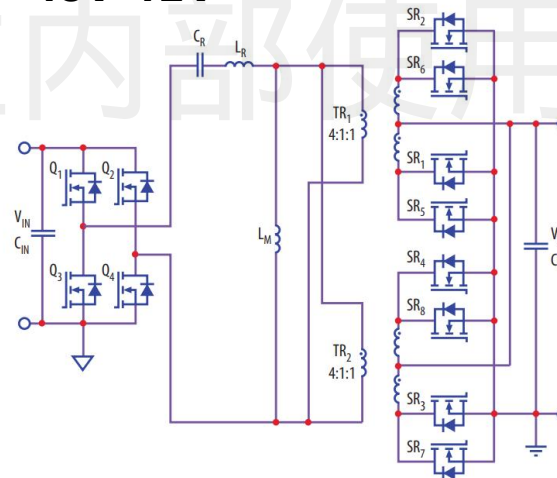
后级调压IBA——LLC-DCX方案

- LLC无需调压, ZVS
- GaN, 峰值效率>98%
- 缩小变压器体积需要更高 f_s (MHz)

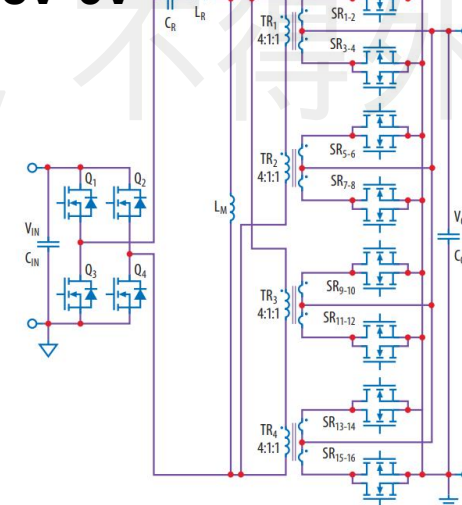


M. H. Ahmed, F. C. Lee and Q. Li, "Two-Stage 48-V VRM With Intermediate Bus Voltage Optimization for Data Centers," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 702-715, Feb. 2021.

48V-12V

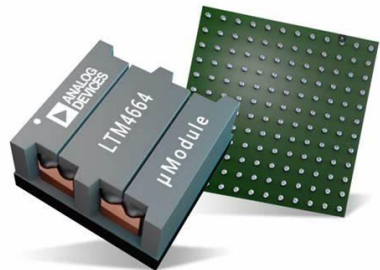
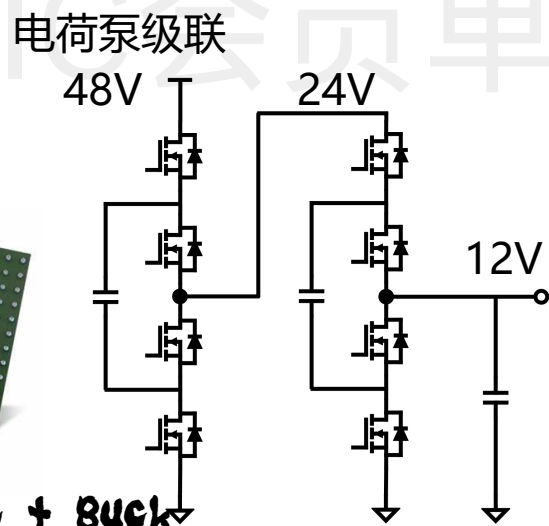
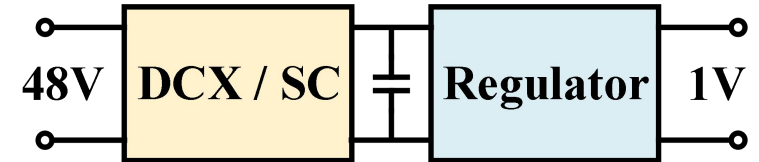


48V-6V

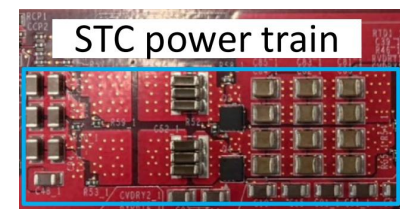
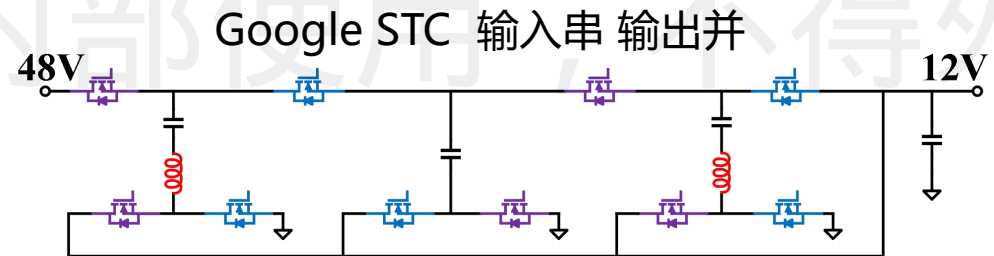


<https://epc-co.com/epc/Applications/DC-DCConversion.aspx>

- 整数倍变比：4:1或6:1，峰值效率>98.5%（4:1）
- 无电感SC：开关过程为脉冲电流，需大量电容
- 谐振SC：需要额外电感，ZCS仍存在 C_{oss} 损耗， f_s 100~300 kHz
- SC方案需要软启动



ADI LTM4664: SC + Buck



S. Jiang, S. Saggini, C. Nan, X. Li, C. Chung and M. Yazdani, "Switched Tank Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 6, pp. 5048-5062, June 2019.

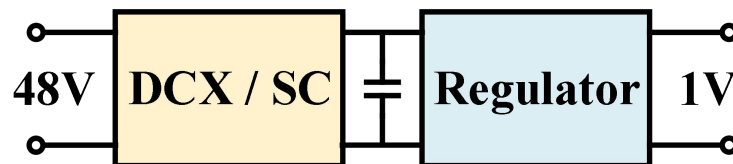
- ☺ 最为常见，中间母线电压通常为12V或更低，前级效率较高
- ☺ 快速迁移，直接利用12V Buck电路及控制方案
- ☹ 仍存在12V Buck 方案的缺点：窄脉冲、器件利用率低、输出电感直流偏置高
- ☹ 前级增加额外的损耗和体积

DCX

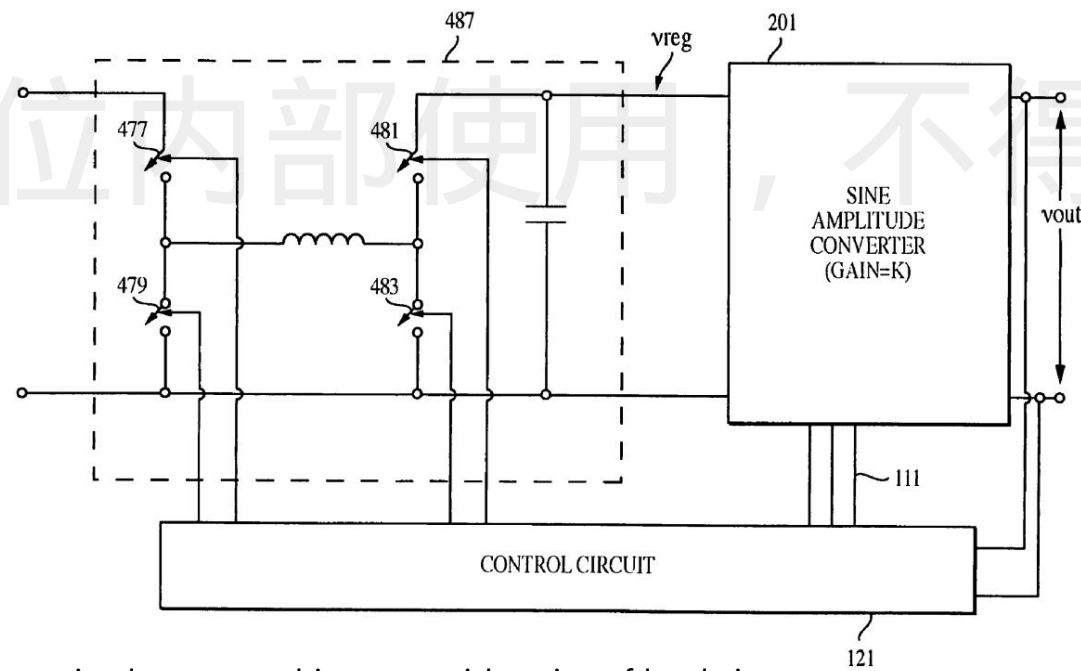
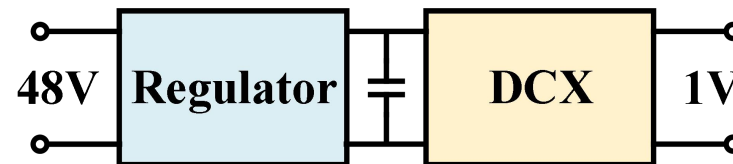
- 电路较简单
- 无需调压、可工作在最佳状态
- 变压器设计为一大挑战
- 需要高频实现高功率密度（MHz）

SC

- 器件电压应力低，但数量较多，且驱动浮地
- 电容的能量密度高
- 无需调压、50%占空比
- ZCS状态频率一般为100-300kHz
- 启动时需要预充电

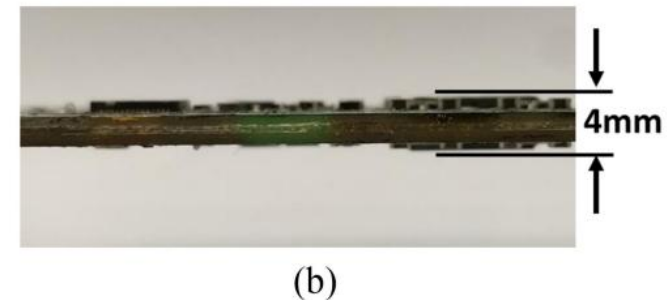
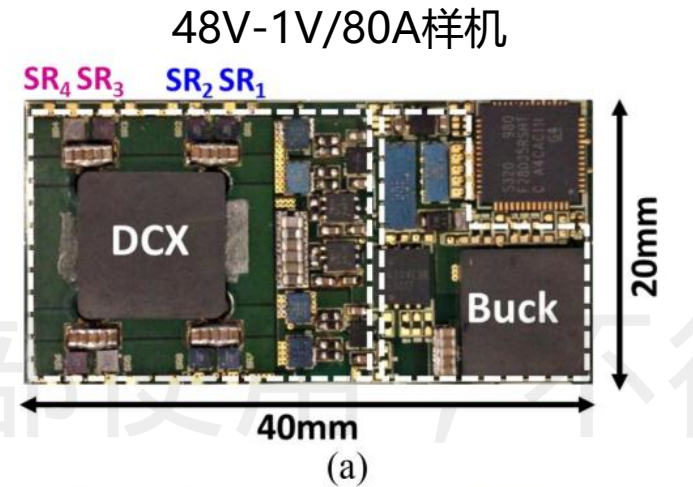
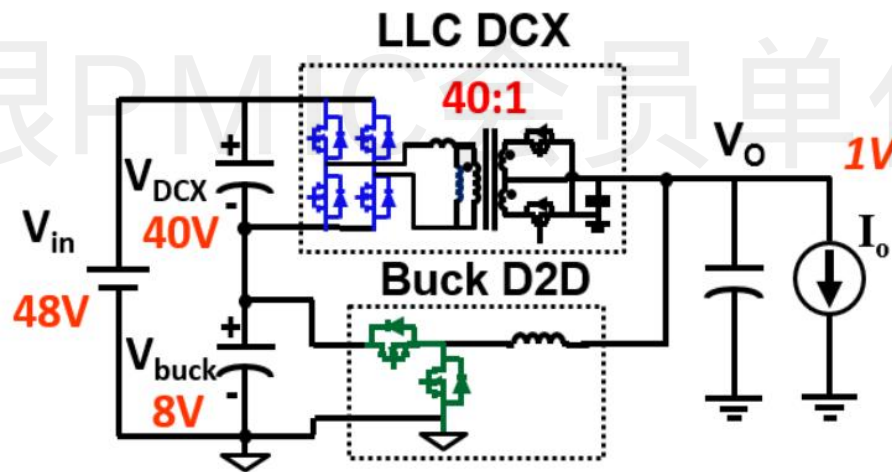


- Vicor方案
- 前级Buck-Boost,
 - 48V-48/36V,
 - 占空比接近50%，器件利用率高、电感纹波小
 - 高压侧电感直流偏置低，高功率密度
- 后级DCX
- 响应速度不如后级调压IBA



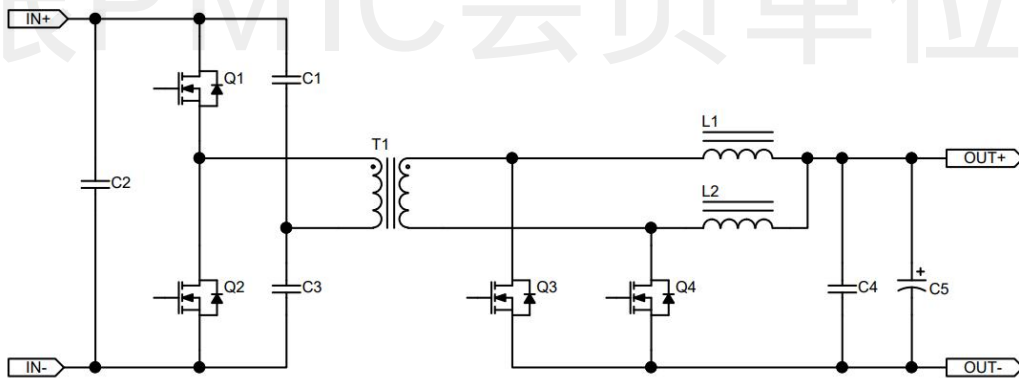
P. Vinciarelli, "Factorized power architecture with point of load sine amplitude converters," U.S. Patent 6 984 965 B2, Jan. 10, 2006.

- LLC传递大部分能量（约80%）
- Buck功率等级低，效率、功率密度均较高
- 负载调节能力受限制

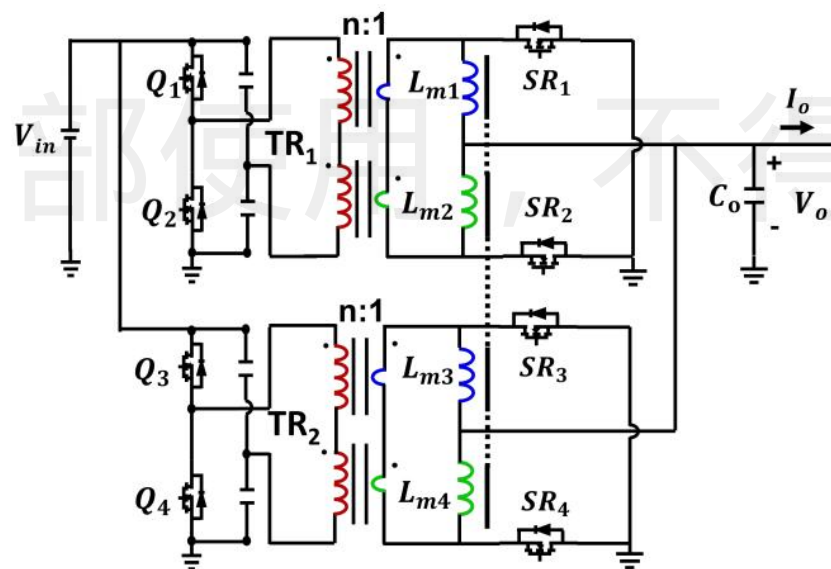


M. H. Ahmed, C. Fei, F. C. Lee and Q. Li, "Single-Stage High-Efficiency 48/1 V Sigma Converter With Integrated Magnetics," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 1, pp. 192-202, Jan. 2020.

- 最早的48V方案，2000年左右
- Half-Bridge/Full-Bridge/ Push-Pull + Current Doubler
- 电路简单
- 动态性能受限于50%最大占空比

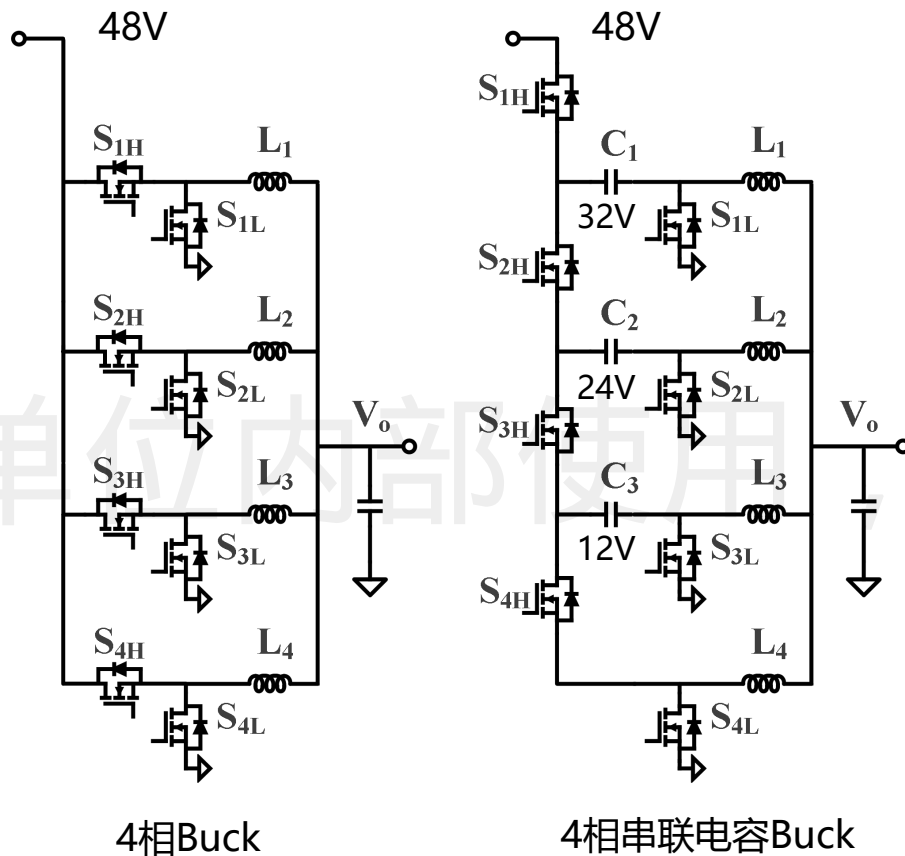


TI - LMG5200POLEV: 48V-1V/50A Demo



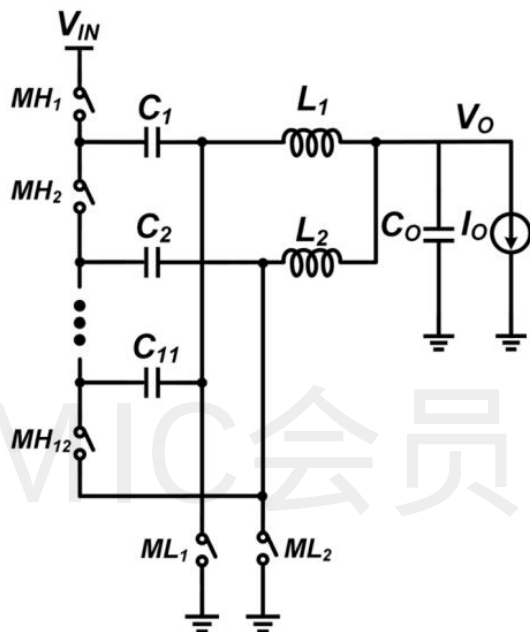
CPES APEC 2022 磁集成

- 电感+SC, PWM模式
- 串联电容Buck及其变形
- N相: 等效输入电压为 $48/N$
- 电感自动均流
- 最大占空比限制: 50%
- 需要软启动



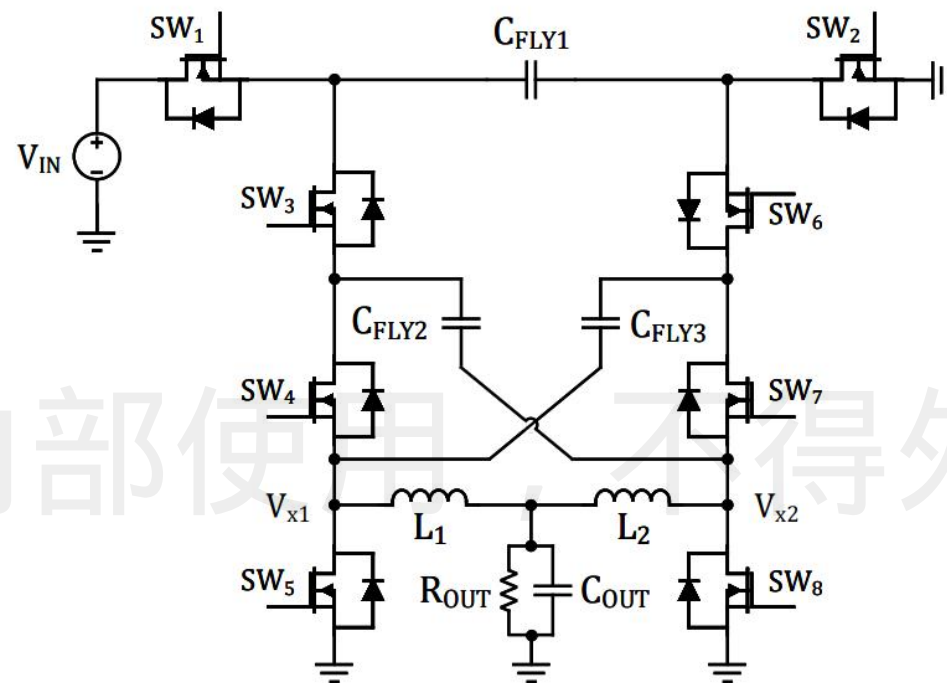
- K. Nishijima, K. Harada, T. Nakano, T. Nabeshima and T. Sato, "Analysis of double step-down two-phase buck converter for VRM," 2005.
- Y. Jang, M. M. Jovanovic, and Y. Panov, "Multiphase buck converters with extended duty cycle, 2006.





12-level 2电感串联电容Buck

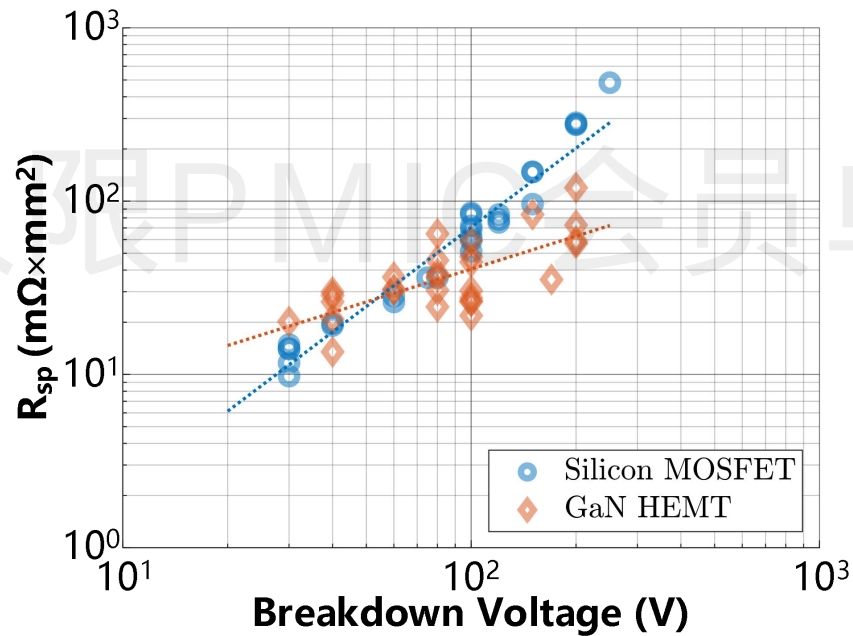
H. Cao et al., "A 12-Level Series-Capacitor 48-1V DC-DC Converter With On-Chip Switch and GaN Hybrid Power Conversion," IEEE J Solid-State Circuits., 2021.



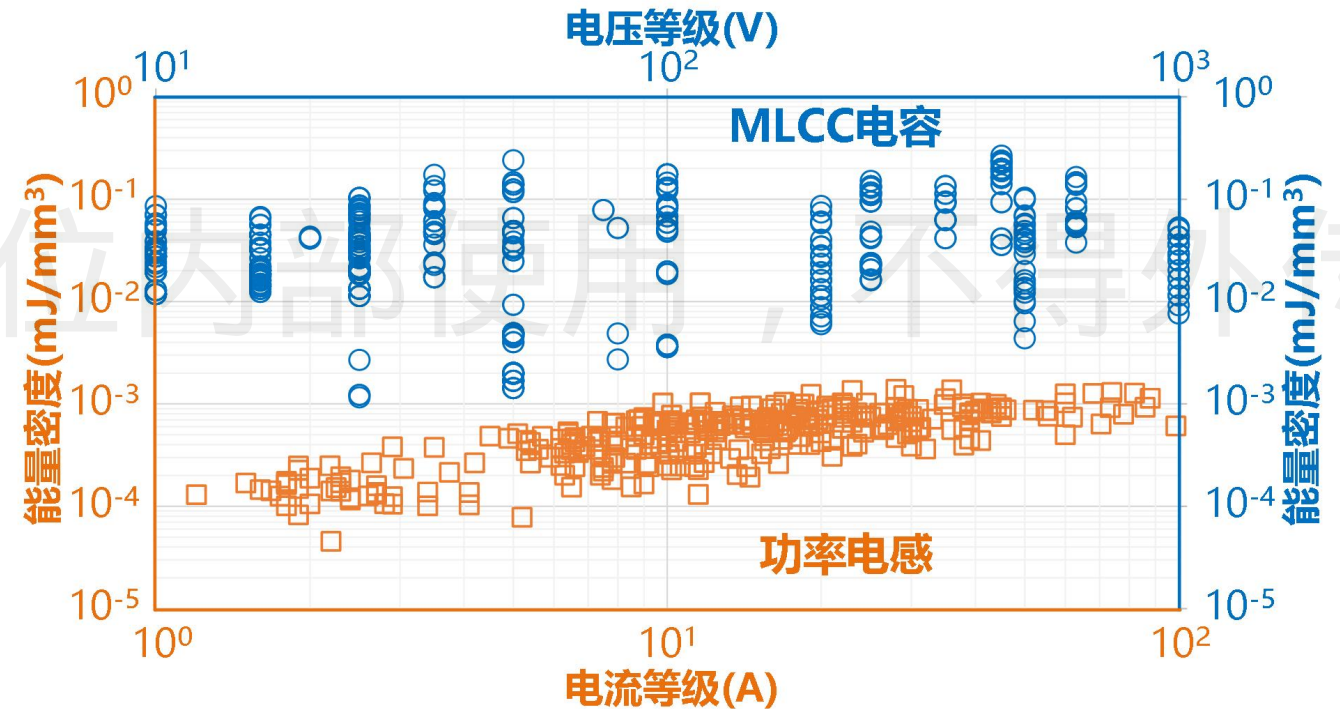
交错串联电容Buck

M. Halamicek, T. McRae and A. Prodić, "Cross-Coupled Series-Capacitor Quadruple Step-Down Buck Converter," APEC, 2020.

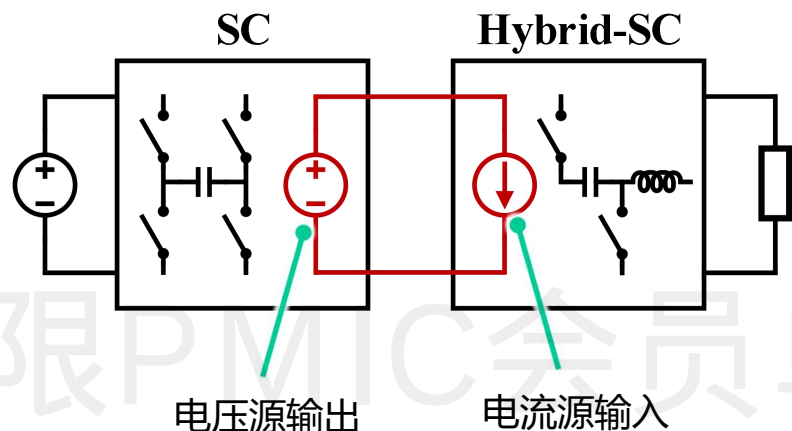
- 开关电容拓扑降低器件电压应力
- 使用低压高性能器件



- 电容 vs 电感



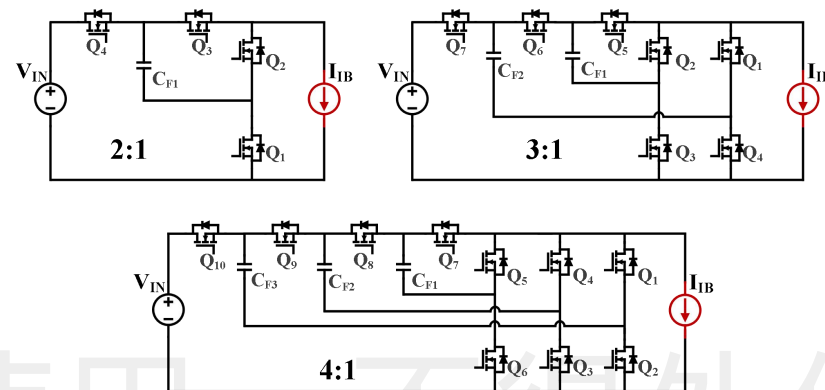
- 前级SC+后级HSC



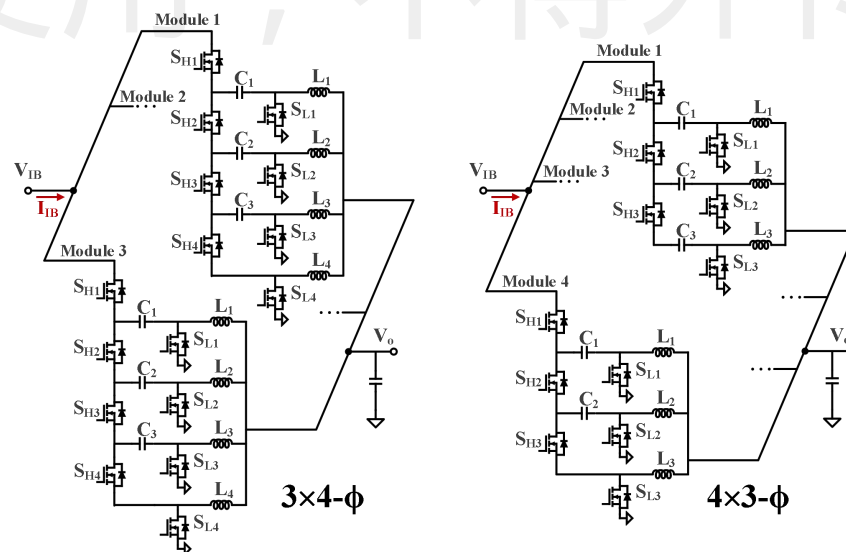
- 移除中间母线电容
- 前级复用后级输出电感：抑制脉冲电流
- 后级复用前级飞跨电容：作为后级输入电容

使用低压器件、只需后级电感、电容传递能量

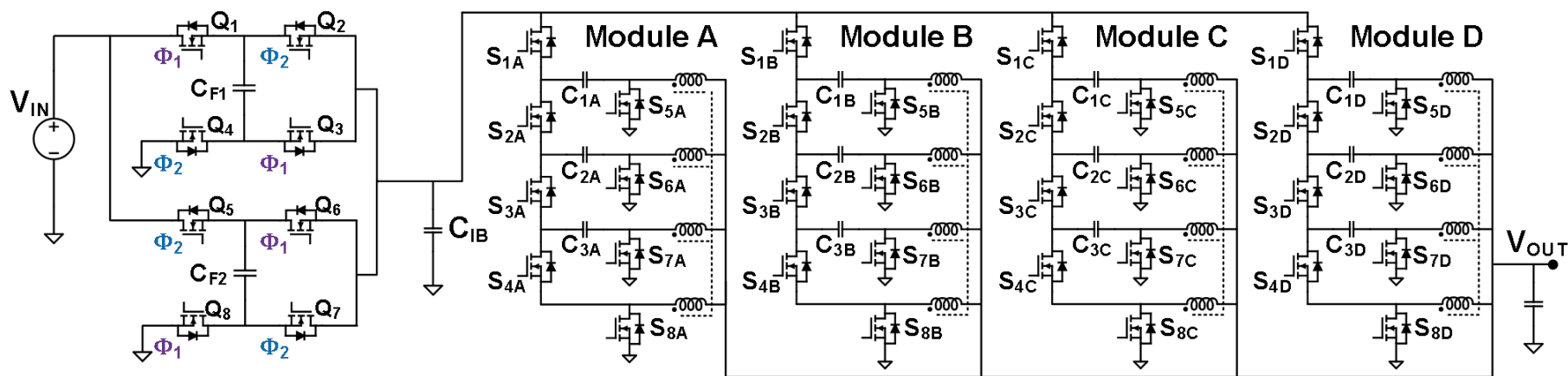
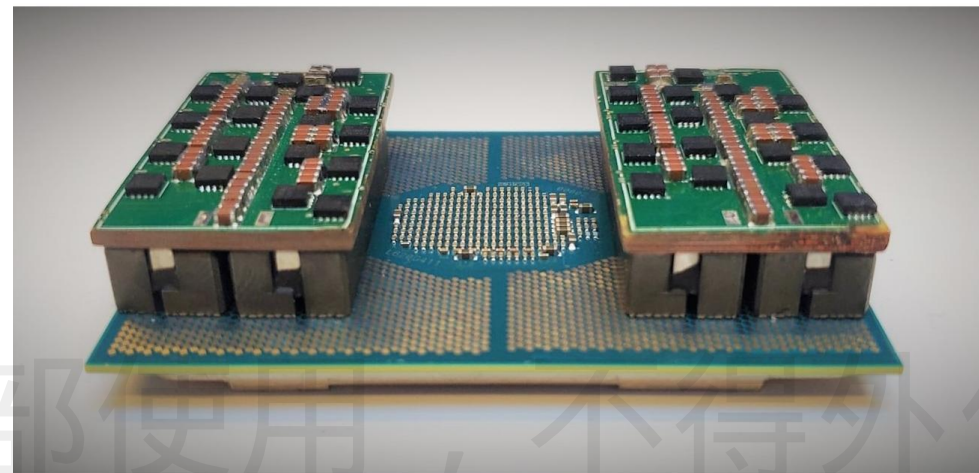
前级拓扑举例

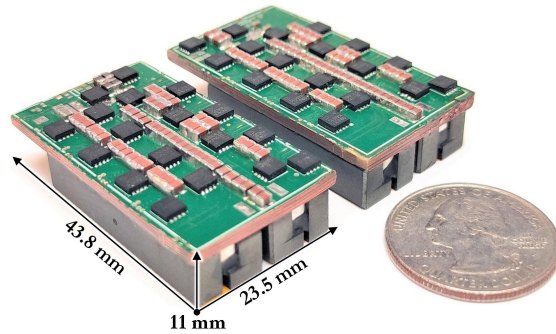


后级拓扑举例

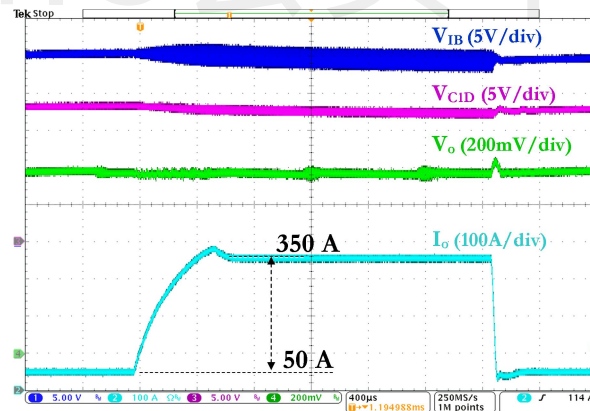
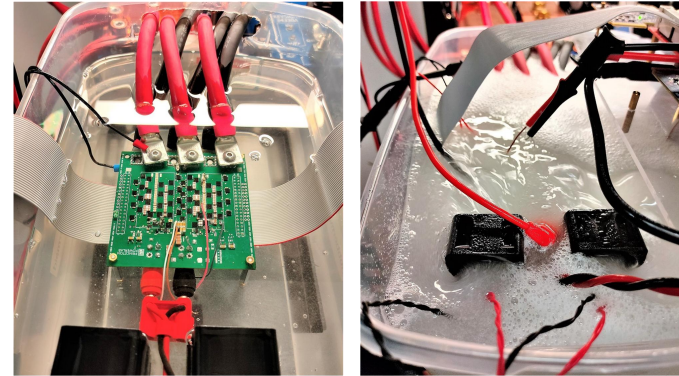


- 前级：48 V-24 V 电荷泵，效率>99%
- 后级：24 V-1 V 串联电容Buck，等效6 V-1 V
- 基于开关电容拓扑
 - 能量密度高
 - 整个拓扑只有Buck电感，便于集成

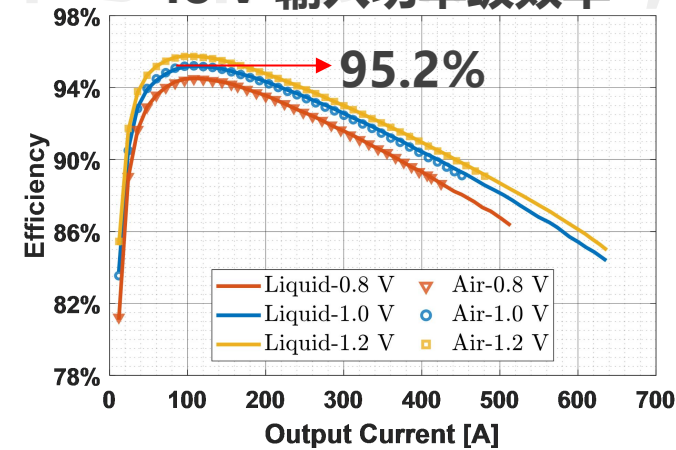




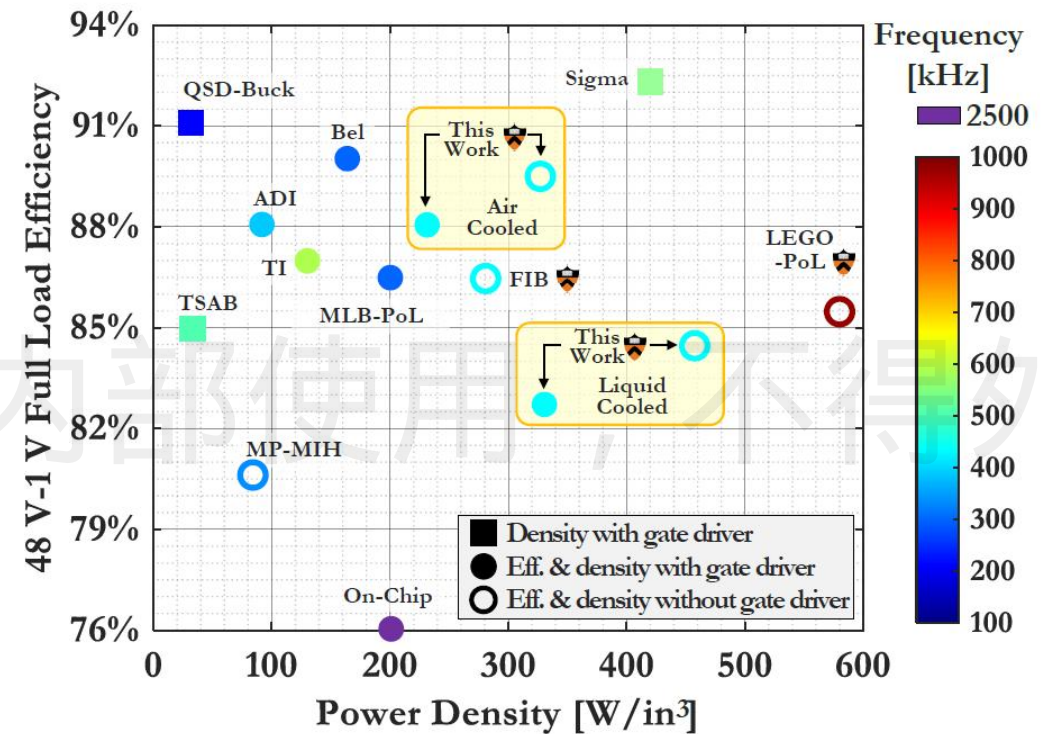
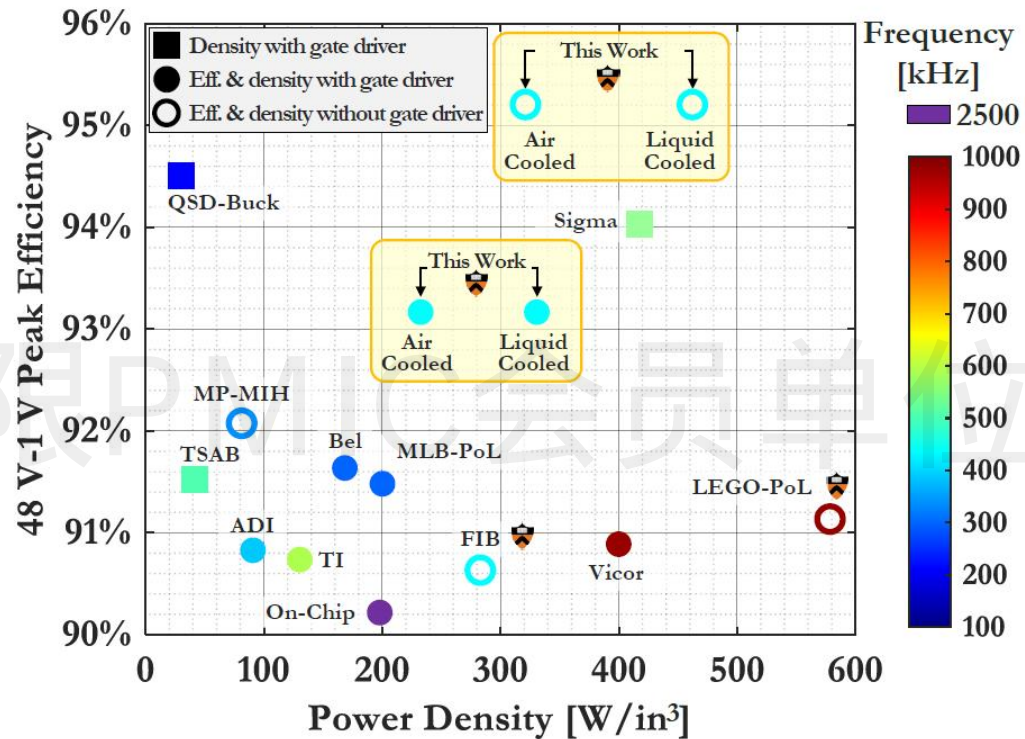
640 A, 1 V, 463 W/in³, 峰值95.2%



48 V 输入功率级效率



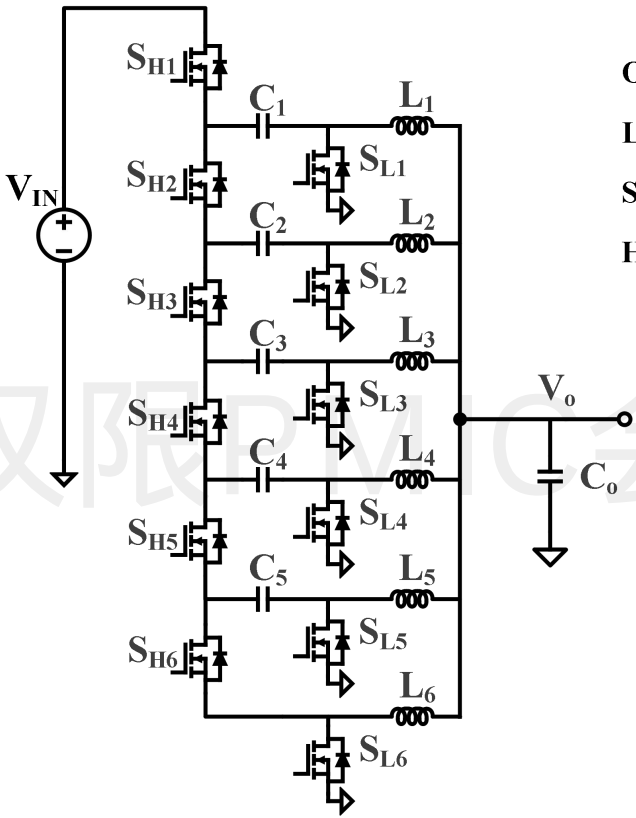
48 V-1 V VRM 性能对比



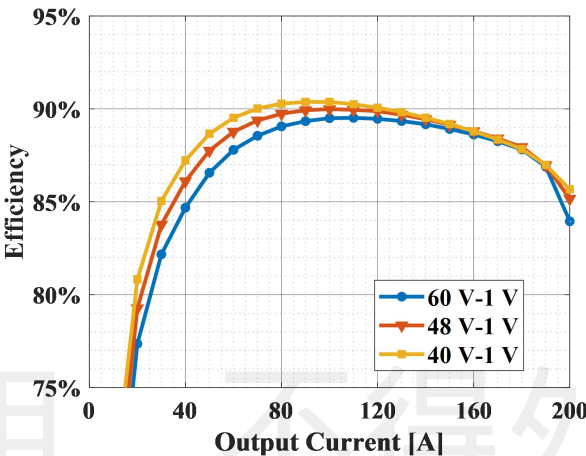
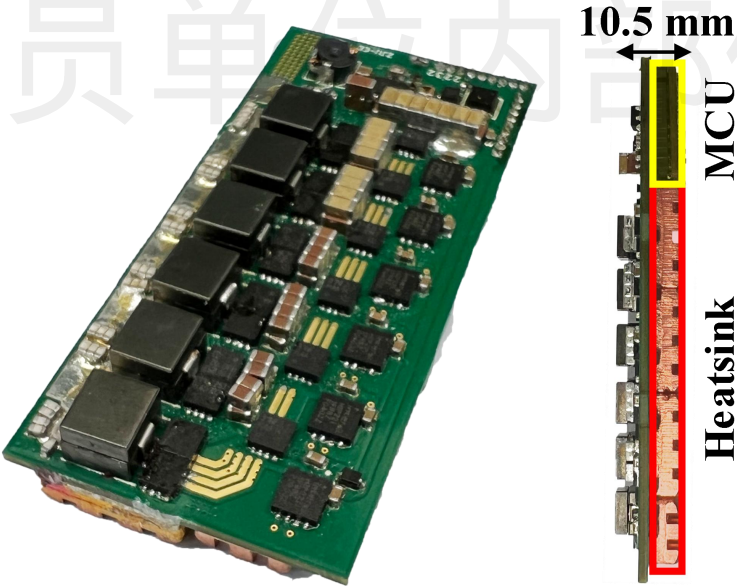
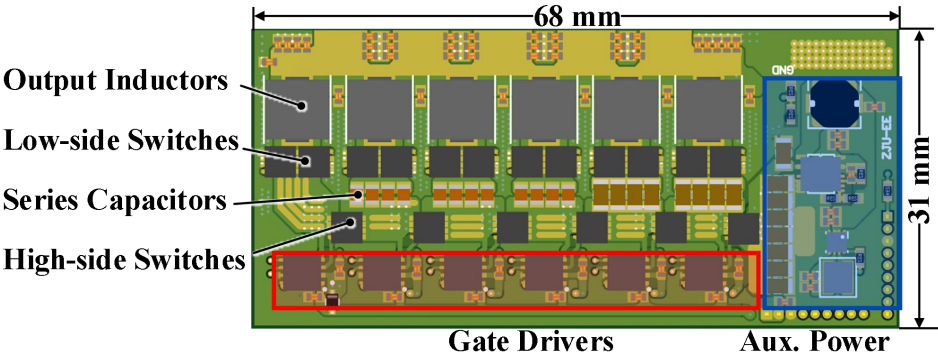
资助与合作方



浙江大学 杭州国际科创中心
ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center

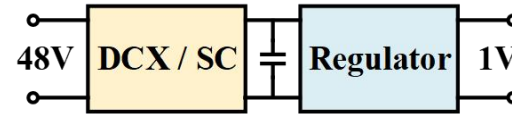


6相串联电容Buck

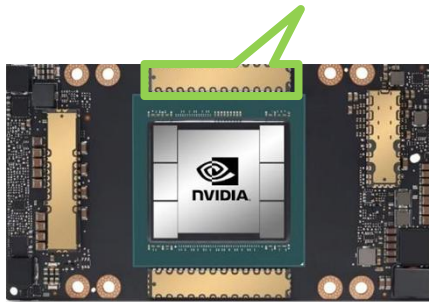
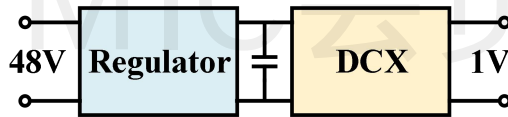


- 目标：负载电流突变时 ($>1000\text{A}/\mu\text{s}$)，维持CPU供电电压
- 措施

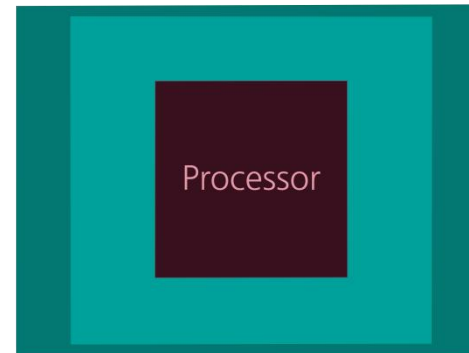
– Constant-On-Time 等非线性控制，基于buck



– 提升功率密度，VRM靠近CPU，足够空间放置输出电容，减小线路寄生电感

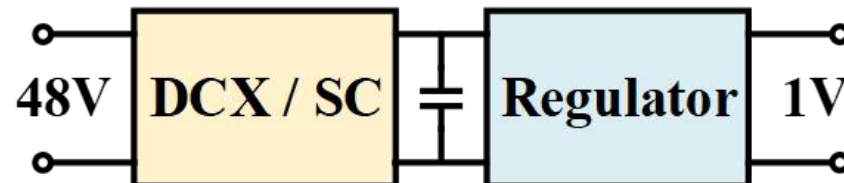
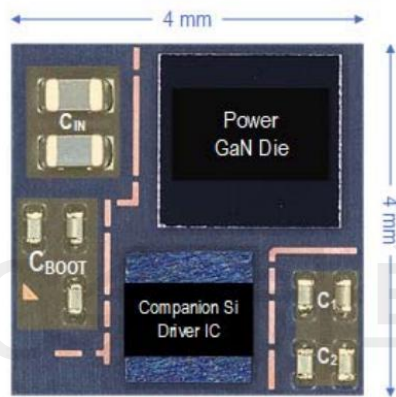


横向供电



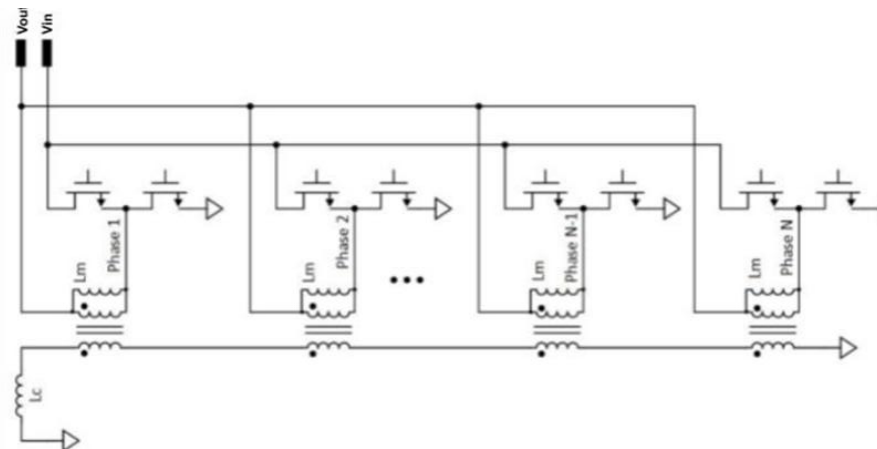
垂直供电

- 输出电流变化率由电感值决定
- 超高频运行



Intel, GaN, 5V转1V/32A,
3~20MHz April 2022.

- 耦合电感
 - 磁路耦合
 - 电路耦合TLVR: trans-inductor voltage regul



- 四类48V架构：后级调压IBA、前级调压IBA、串并联、单级
- 拓扑：DCX、Switched-Capacitor、HSC
- 48V-VRM新拓扑的控制方案？如HSC能否做到与Buck VRM同样的动态性能
- 朝芯片化集成化发展

仅限PMIC会员单位内部使用，不得外传



Thanks

陈 烨 楠 博士

主页: <https://person.zju.edu.cn/yenan>

地址: 杭州萧山区建设三路733号

手机: +86-13575472599

邮箱: yenanc@zju.edu.cn

