

# 电力电子器件及其应用的现状和发展

电力电子器件及其应用装置已日益广泛地应用和渗透到能源、交通运输、环境、先进装备制造、激光、航空航天及航母、舰船、坦克、第五代战机、激光炮、电磁炮等现代化国防武器装备诸多重要领域。这与近 30 多年来电力电子器件与电力电子技术的飞速发展和电力电子的重要作用密切相关。

## 一、电力电子的重要作用

二次大战后，特别是上世纪 80 年代以后，电子技术（包括：半导体、微电子技术；计算机、通信技术；电力电子技术等）的飞速发展，给世界科学技术、经济、文化、军事等各方面带来了革命性的影响。

概括地说，电子技术包含两大部分：信息电子技术（包括：微电子、计算机、通信等）是实施信息的传输、处理、存储和产生控制指令；电力电子技术是实施电能的传输、处理、存储和控制，它不但要保障电能安全、可靠、高效和经济的运行，而且还要将能源与信息高度地集成在一起。如果用人体组成来比喻的话，信息电子相当于人的大脑和神经中枢，负责思考和指挥；而电力电子则相当于人体的心血管系统和四肢，负责为人体活动提供能量和承担执行的功能，两者缺一不可，不可能互相代替！

事实表明，无论是电力、机械、矿冶、交通、石油、能源、化工、轻纺等传统产业，还是通信、激光、机器人、环保、原子能、航天等高新技术产业，都迫切需要提供高质量、高效率的电能。而电力电子正是将各种一次能源高效率地变为人们所需的电能。它是实现节能环保和提高人民生活质量的重要手段，它已经成为弱电控制与强电运行之间、信息技术与先进制造技术之间、传统产业实现自动化、智能化改造和兴建高科技产业之间不可缺少的重要桥梁。所以电力电子是我国国民经济的重要基础技术，是现代科学、工业和国防的重要支撑技术。时至今日，无论高技术应用领域，还是传统产业，特别是我国一些重大工程（三峡、特高压、高铁、西气东输等），乃至照明、家电等量大面广的与人民生活密切相关的应用领域，电力电子产品已经无所不在，下表列出各主要应用领域必须用到的关键应用装置：

应用领域	关键的应用装置（系统）
先进能源	大功率高性能 DC/DC 变流器；大功率风力发电机的励磁与控制器；风力发电用永磁发电机变频调速装置；大功率并网逆变器，储能装置等
电力	高压直流输电系统（包括：海上风力发电用岸上轻型高压直流输电装置等）；灵活交流输电系统（包括：静止无功补偿器，静止无功发生器，潮流调节器等）；有源电力滤波器；动态电压补偿器；电力调节器；电子短路限流保护器等
重大、先进装备制造	大功率变流器及其控制系统；大功率高精度程控交、直流电源系统；高精度数控机床的驱动和控制系统；快中子堆，磁约束核聚变用高精度电源等
交通运输	大功率牵引、变频调速装置及系统控制器；电力牵引供电系统电能质量控制装置和通信系统
激光	超大功率脉冲电源
航空航天	400Hz 大功率供电系统；高效、高可靠性驱动器、推进器和电源；全电化机载综合电力系统
舰船	高可靠的分布式供电系统；高效、高可靠性驱动器、推进器和电源；全电化机载综合电力系统
现代武器装备	高速鱼雷发射器电源；电磁炮、大功率激光武器驱动电源；大功率固态发射机等
环境保护	高压脉冲电源及其控制系统等
前沿科学研究	特种大功率电源及其控制系统

众所周知，能量的合理利用，电气系统的微型化及电源智能管理促进了电力电子近 50 年的革命性发展。而新型电力电子器件的出现，总是带来一场电力电子技术的革命。电力电子器件就好像现代电力电子装置的“心脏”，虽然它在整台装置中的价值通常不会超过总价值的 20%—30%，但是，它对装置的总价值，尺寸、重量、动态性能，过载能力，耐用性及可靠性等，却起着十分重要的作用。因此，新型电力电子器件及其相关新型半导体材料的研究，一直是电力电子领域极为活

跃的主要课题之一。可以这么说：没有各种现代电力电子器件，就没有现代电力电子装置及其应用；没有日益扩大的电力电子应用市场需求强烈的推动和促进，也不会出现今天现代电力电子器件的蓬勃发展的局面。

## 二、电力电子器件现状和发展

一个理想的功率半导体器件，应当具有下列理想的静态和动态特性：在阻断状态，能承受高电压；在导通状态，具有高的电流密度和低的导通压降；在开关状态和转换时，具有短的开、关时间，能承受高的  $di/dt$  和  $dv/dt$ ，具有低的开关损耗；运行时具有全控功能和良好的温度特性。

自从 50 年代硅晶闸管问世以后，功率半导体器件的研究工作者为达到上述理想目标做出了不懈的努力，并已取得了世人瞩目的成就。早期的大功率变流器，如牵引变流器几乎都是基于晶闸管的。到了 20 世纪 80 年代中期，4.5kV 的 GTO 得到广泛应用，并成为在接下来的十年内大功率变流器的首选器件，一直到 IGBT 的阻断电压达到 3.3kV 之后，这个局面才得到改变。与此同时，对 GTO 技术的进一步改进导致了 IGCT 的问世，它显示出比传统 GTO 更加显著的优点。目前的 GTO 开关频率大概为 500Hz，由于开关性能的提高，IGCT 和大功率 IGBT 的开通和关断损耗都相对较低，因此可以工作在 (1~3) kHz 的开关频率下。至 2005 年，以晶闸管为代表的半控型器件已达到  $7 \times 10^7$  W/9000V 的水平，全控器件也发展到了十分高的水平。当前，硅基电力电子器件的水平基本上稳定在  $10^9$ – $10^{10}$  瓦·赫兹左右，已逼近了由于寄生二极管制约而能达到的硅材料极限，如图 1 所示。

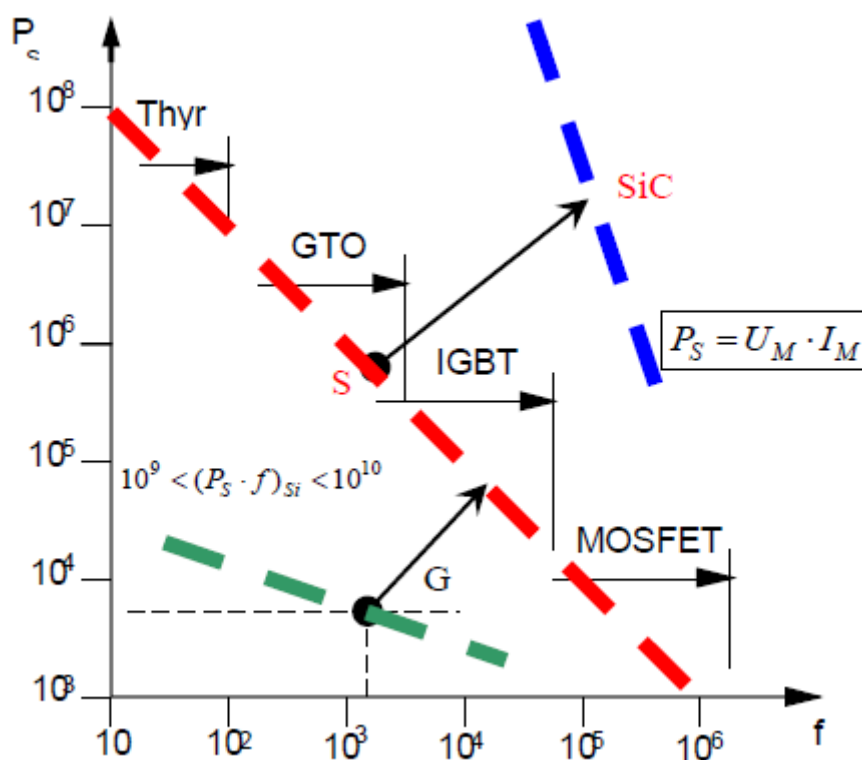


图1 电力电子器件的功率频率乘积和相应半导体材料极限[1]

不难理解，更高电压、更好开关性能的电力电子器件的出现，使在大功率应用场合不必要采用很复杂的电路拓扑，这样就有效地降低了装置的故障率和成本。图2为电力电子器件发展历史示意图。图3概括了当前市场上最主要的电力电子器件及其对应的电压和电流等级。

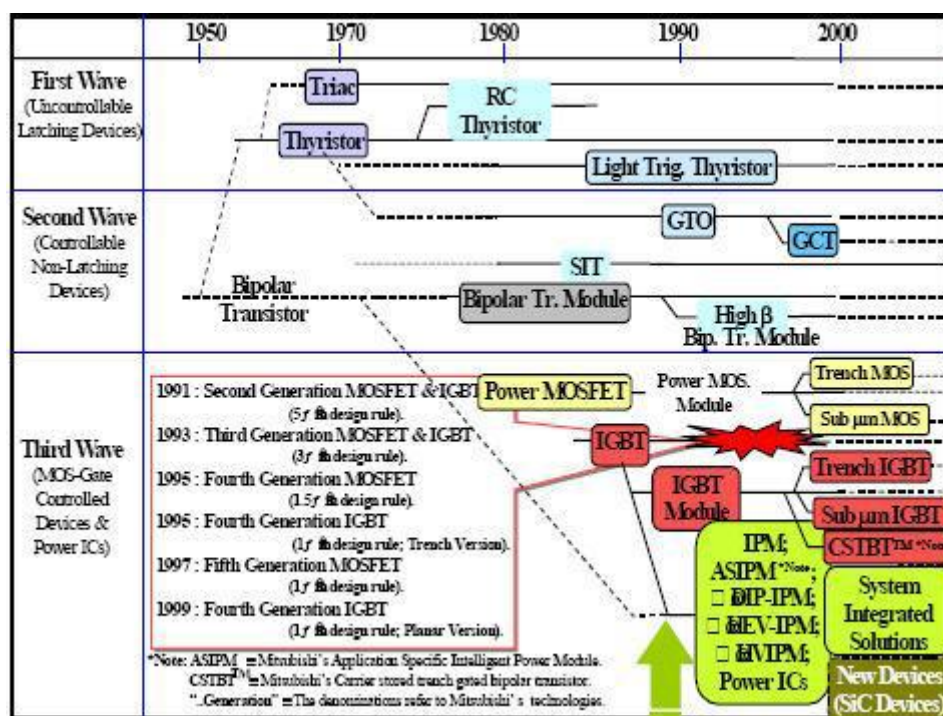


图 2 (a) 电力电子器件发展历史示意图

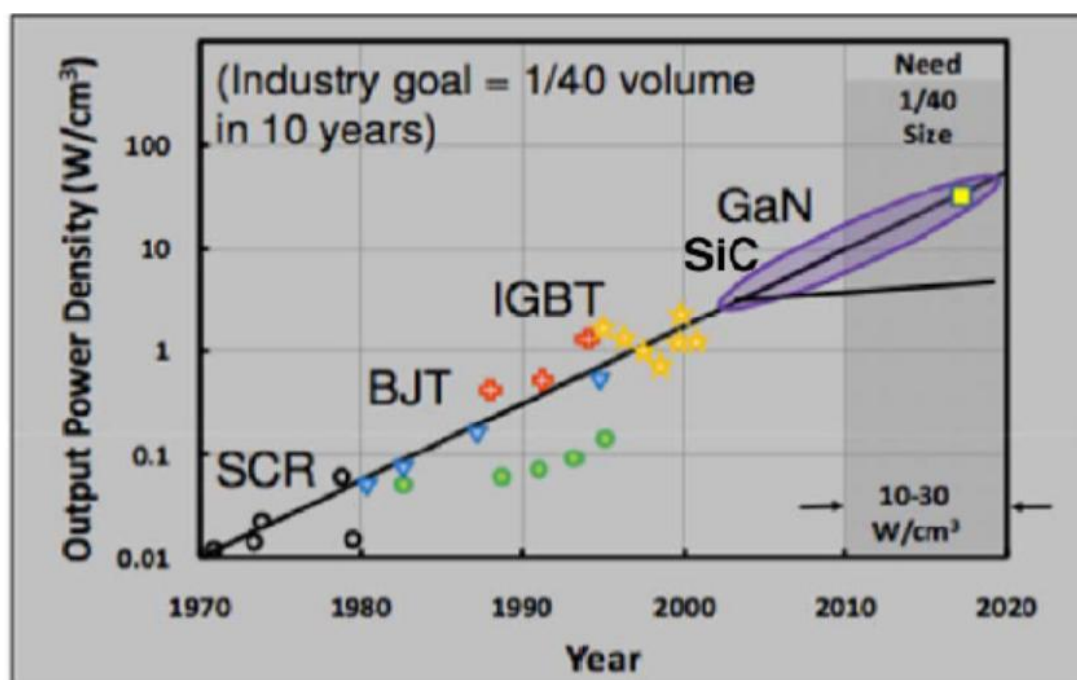


图 2 (b) 电力电子器件发展历史示意图

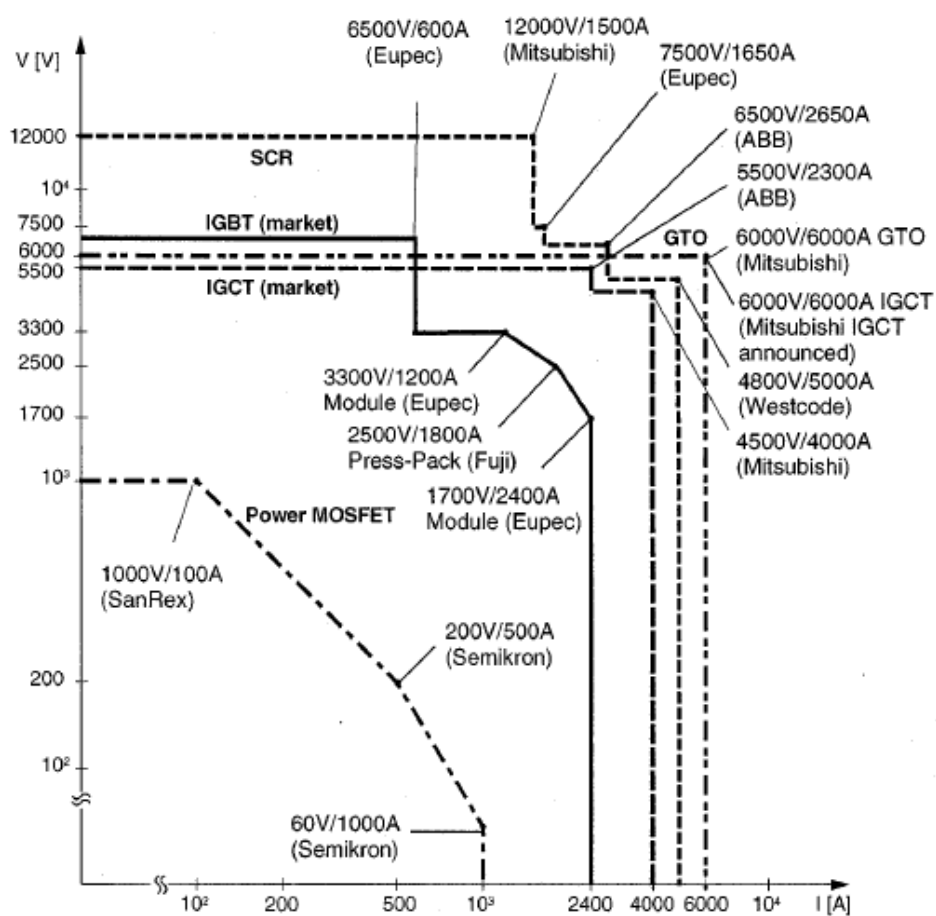


图 3 市场上主要电力电子器件的额定电压与电流示意