



Is Now Part of



ON Semiconductor®

To learn more about ON Semiconductor, please visit our website at
www.onsemi.com

ON Semiconductor and the ON Semiconductor logo are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba ON Semiconductor or its subsidiaries in the United States and/or other countries. ON Semiconductor owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of ON Semiconductor's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. ON Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. ON Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does ON Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using ON Semiconductor products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by ON Semiconductor. "Typical" parameters which may be provided in ON Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. ON Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. ON Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use ON Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold ON Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that ON Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part. ON Semiconductor is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

AN-4155

适用于感应加热应用的飞兆半导体第二代、场截止、阳极短路、沟道 IGBT

总结

飞兆半导体最近开发了一个场截止、阳极短路绝缘栅极双极晶体管 (IGBT) 产品系列, 支持电压范围 1100–1400 V 并包含一个固有体二极管。由于固有反并联二极管适用于软换流, 这些新型 IGBT 适用于软开关应用, 比如电磁炉和逆变微波炉。随着典型非穿通 (NPT) IGBT 技术的进步, 飞兆半导体阳极短路硅技术提供比具有相同额定值的 NPT 沟道 IGBT 更低的饱和电压 (最多可低 12.5%) 和更低的尾电流 (最多可低36%)。

引言

随着功率半导体的快速进步, 从成本和性能角度考虑, 每种功率电子应用都要求使用专用半导体开关器件。尽管由于不可避免的较大脱尾电流损耗, IGBT 的工作频率已限制到几十 kHz, 它仍然非常适合额定电压超过 600 V 的高功率应用。饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 随 BV_{ces} 变化的增量, 与其他开关器件相比, 相对较小。

现今最常用的 IGBT 技术是场截止 IGBT (FS IGBT), 它结合了 PT (穿通) 和 NPT (非穿通) IGBT 结构的优点, 同时克服了两者的缺点。FS IGBT 在通态期间提供较低的饱和压降 $V_{CE(sat)}$, 在关断瞬间提供较低的开关损耗。但由于所有其他类型的 IGBT 不含有固有体二极管, 所以大多数开关应用通常将其与其他快速恢复二极管 (FRD) 封装在一起。

同时, 可考虑在感应加热应用中使用两种类型的谐振逆变器、半桥式 (HB) 逆变器和单端 (SE) 逆变器。由于单端谐振逆变器具有更低的成本结构、提供相对较高的效率、能够处理相对较高的额定功率 (约高达 2 kW), 因此更为常用。

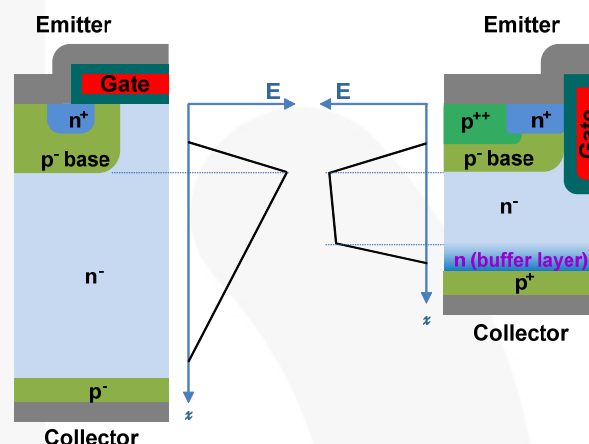


图 1. NPT IGBT (左) 和场截止 IGBT (右)

本应用指南介绍飞兆半导体带有固有体二极管 (不同于普通 IGBT) 的第二代、场截止、阳极短路、沟道 IGBT 产品系列, 并探讨其在感应加热 (IH) 应用单端谐振逆变器中的有效性。

飞兆半导体的新型场截止、阳极短路、沟道 IGBT 技术

尽管 NPT IGBT 通过在关断过渡过程中减少少数载流子注入数量和提升复合率提高了关断速度, 由于其较高的 $V_{CE(sat)}$ 仍不太适合某些高功率应用。较高的 $V_{CE(sat)}$ 是由轻度掺杂的 n^- 漂移层导致的, 因此需要较厚的漂移层维持关断状态下的电场, 如图 1 所示。 n^- 漂移层的厚度是 IGBT 中饱和压降的主要因数。

通过在 n^- 漂移层和 p^+ 集电极之间插入 n 掺杂场截止层, 如图 1 右侧所示, 可减小 n^- 漂移层的厚度。此概念 (IGBT 应用该概念) 即被称之为场截止 IGBT (FS IGBT)。在 FS IGBT 中, 场截止层内的电场急剧减小, 而在 n^- 漂移层中会逐渐减小。因此, n^- 漂移层的厚度和饱和压降可显著降低。沟道栅极结构改善了饱和压降。此外, 场截止层在关断瞬间期间加快了多数载流子复合, 因此其尾电流远远小于 NPT 或 PT IGBT。这降低了开关损耗。

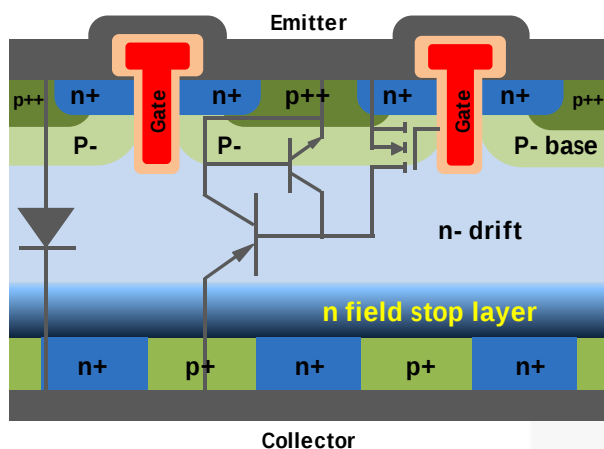
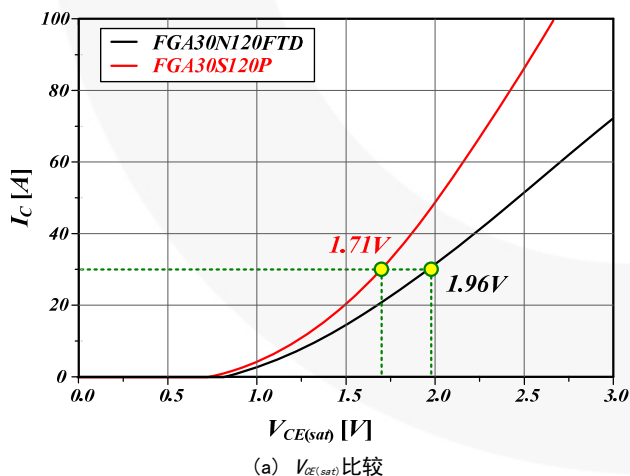
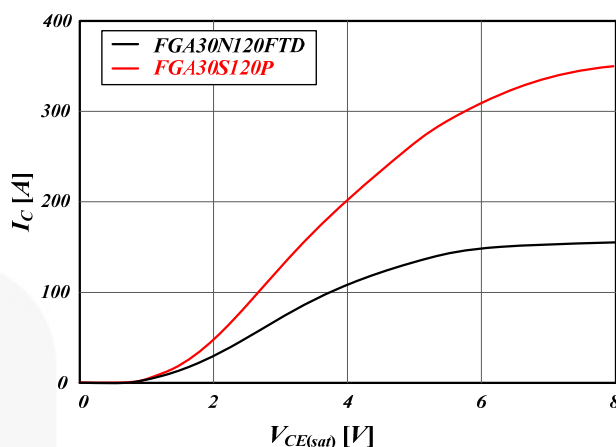


图 2. FS SA T IGBT 截面

传统 FS IGBT 由于 $p^+n^-n^-p^+$ 结构而不包括类似 PT 和 NPT IGBT 的固有体二极管。因此，多数应用中，它与其他快速恢复二极管封装在一起。最近，出现了一种新理念，即阳极短路 IGBT (SA IGBT)，它将体二极管嵌入到 IGBT 中，嵌入方式与金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 相同。

图 2 显示了将阳极短路理念移植到场截止沟道 IGBT 的概念。阳极短路场截止沟道 IGBT (FS SA T IGBT) 的主要理念是将 n^+ 集电极间歇地插入到 p^+ 集电极层。在这种情况下， n^+ 集电极直接接触场截止层并用作 PN 二极管的阴极，而 p^+ 集电极层用作 FS T IGBT 的通用集电极。这种阳极短路 IGBT 采用相同的封装，但具有增强的电流特性并改善了成本结构，因为不需要使用共封装反并联二极管，可以将较大的裸片安装到封装内。

即使结合了快速恢复二极管和 IGBT 功能，但 FS SA T IGBT 的性能仍比传统 FS T IGBT 要好。

(a) $V_{CE(sat)}$ 比较

(b) 饱和电流比较

图 3. 饱和电压与集电极电流

图 3 显示了新器件 (FGA30S120P) 和传统 FS T IGBT (FGA30N120FTD) 在饱和电压和电流特性方面的比较。这两个器件具有相同的额定电流。在额定电流 30 A 下，FGA30S120P 的 $V_{CE(sat)}$ 是 1.71 V，而 FGA30N120FTD 的是 1.96 V (提高 12.8%)。新器件的饱和电流是老器件的两倍多。

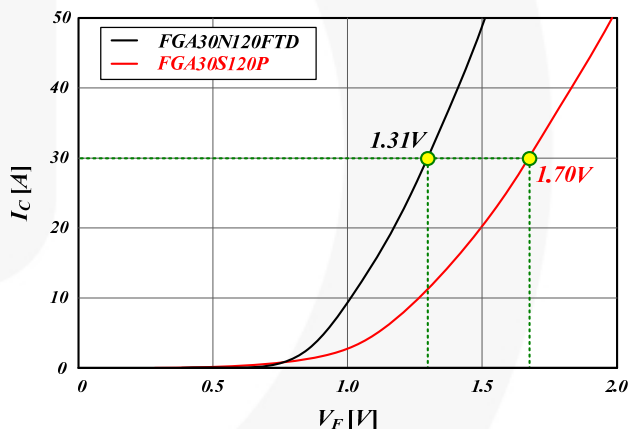


图 4. 正向压降比较

图 4 显示 FGA30S120P 和 FGA30N120FTD 反并联二极管的正向压降特性。在额定电流 30 A 下，FGA30S120P 的正向压降 V_F 是 1.70 V，而 FGA30N120FTD 的正向压降是 1.31 V。因为新器件采用 p 基和轻度掺杂的 n^- 漂移层的 IGBT 结构作为快速恢复二极管，而传统 IGBT 与超快速恢复二极管使用同一封装，体二极管的正向压降自然比传统的要高些。

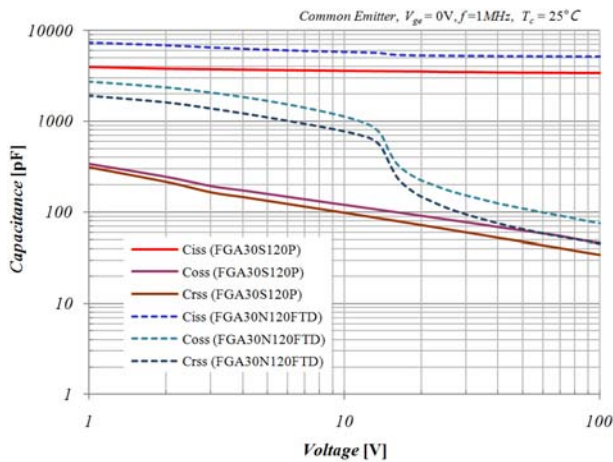


图 5. 电容比较

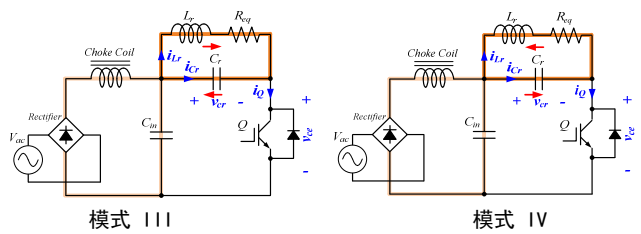
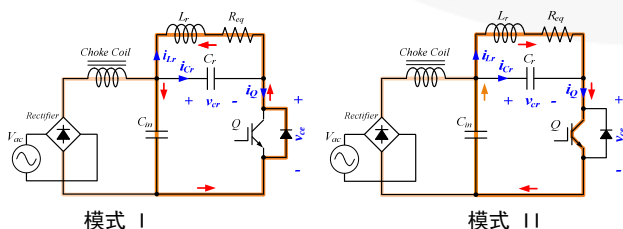
图 5 显示 FGA30S120P 和 FGA30N120FTD 之间的电容特性比较。通过先进的沟道栅极和经过优化的场截止层结构，新器件 FGA30S120P 实现更低的电容特性和更低的栅极电荷，因此能够提供最佳的开关性能。

用于感应加热应用的单端谐振逆变器

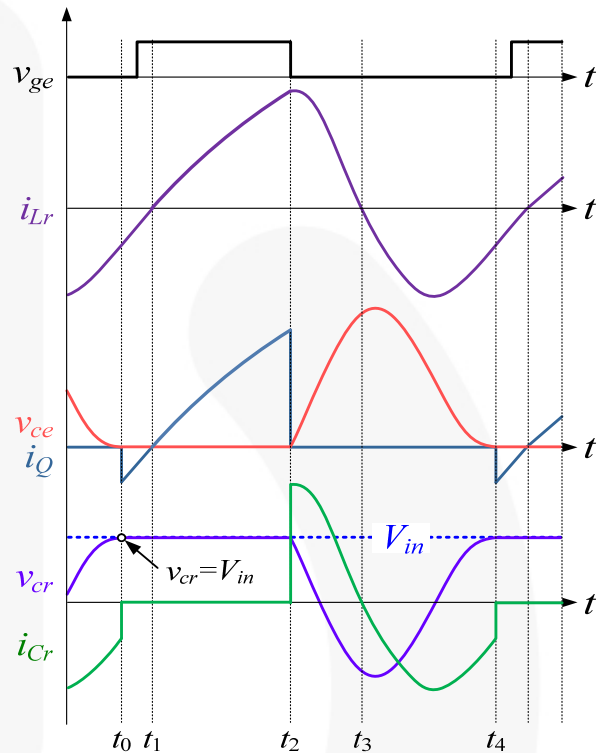
单端谐振逆变器是“E”类系列谐振逆变器，由于其较低的成本结构和相对较高的效率，常用于感应加热应用。^[1-4] 图 6 基本运行模式和理论波形如图所示。整流器、扼流线圈和输入电容 (C_{in}) 组成一个低通滤波器 (LPF)。工作线圈相当于电感 (L_r) 和电阻 (R_{eq}) 的串联，与电容 (C_r) 一起组成谐振回路。

逆变器的运行分成四种模式，如图 6(a) 所示。在模式 I (t_0 至 t_1 时段) 下，谐振电流流过反并联二极管，因此 IGBT 的集电极-发射极电压 (V_{ce}) 变为零。在这种模式下，IGBT 应该导通，激活零电压开关 (ZVS)。在模式 II (t_1 至 t_2 时段) 下，电感电流流过 IGBT。IGBT 在 t_2 时刻关断，模式 III 开始。在这种模式下，在 L_r 和 C_r 间形成一个准谐振电路。在 t_3 时刻，谐振电流方向改变，模式 IV 开始。在 t_4 时刻，谐振电压变为零，再次重复四个模式。

单端谐振逆变器中的 IGBT 在零电压开关条件下由续流电流导通，在准零电压开关条件下通过比输入电压高得多的谐振电压关断。若要在零电压开关条件下导通 IGBT，尽管只能换流一小段时间，仍需要使用反并联二极管。在关断时段， L_r 和 C_r 之间出现电压谐振，需要 IGBT 提供更高的击穿电压。通常来说，在单端谐振逆变器应用中采用 1000~1600 V 的 IGBT。



(a) 电路图和运行模式



(b) 理论波形

图 6. 用于感应加热应用的单端谐振逆变器

若要实现零电压开关导通和关断，关断时间必须固定为 t_2 至 t_4 时段，而导通时间可变，以控制功率。

通过零电压开关运行，该逆变器可提供较高的效率。然而，需要使用一个高压 IGBT 作为开关器件，因为会有非常高的谐振电压应用于 IGBT。建议使用额外的辅助 IGBT 和箝位电路抑制开关电压应力^[5, 6]，但由于成本较高，它们在实际感应加热应用中并不实用。因此，传统单端谐振逆变器继续普遍使用，尤其是在电磁炉、电饭锅和逆变微波炉中。

IGBT 的 $V_{CE(sat)}$ 和尾电流是决定系统效率和确保感应加热应用稳定性的关键因素。

即使 IGBT 适合在高压应用中用作开关器件， $V_{CE(sat)}$ 和尾电流也应随着击穿电压增加而增加。

在图 6 所示单端谐振逆变器中， i_{Leq} 流过 L_{eq} 、 R_{eq} 、 Q 和 C_{in} ，能量在 IGBT 导通时段传输至负载。因此，电压计算方程式如下：

$$V_{in} - L_{eq} \frac{di_{Leq}}{dt} - R_{eq} i_{Leq} = 0 \quad (1)$$

电感电流由下列方程式得出：

$$i_{Leq(on)}(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (2)$$

当 IGBT Q 在 t_2 时刻关断时, L 和 C_r 之间的谐振开始, 电压和电流计算式如下：

$$\frac{V_{in}}{s} - \frac{1}{sC} I_{off}(s) + L \{ s I_{off}(s) - I_o \} + R I_{off}(s) = 0 \quad (3)$$

$$i_{Leq(off)}(t) = e^{-\alpha t} A \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

其中,

$$A = \sqrt{\left(\frac{E}{\omega L} - \frac{\alpha I_o}{\omega} \right)^2 + I_o^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha L I_o - E}{\omega L I_o} \right)$$

$$\alpha = \frac{R_{eq}}{2L} \quad \text{和} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_{eq}}{2L} \right)^2}$$

若要在零电压开关条件下导通 IGBT, 需要使用一个反并联二极管; 然而, 二极管只能换流一小段时间, 其性能微不足道。

实验结果

为了验证新型 FS SA T IGBT 在用于感应加热应用单端谐振逆变器时的有效性, 通过一个用在电磁炉中的 1.8 kW 单端谐振逆变器设计了一个实验, 进行测试。

图 7 显示栅极信号以及试验设置的开关电压和电流的测得波形。如图所示, IGBT 在零电压条件下导通和关断。图 7 还显示二极管电流比 IGBT 电流要小得多, 说明尽管新型 FS SA T IGBT 的固有二极管性能不尽人意, 它仍适合作为单端谐振逆变器的开关器件。开关性能比较, 如图 8 所示。结果显示新器件关断瞬态的性能略低于旧版本, FGA30S120P 的关断能量 (E_{off}) 为 160 μ J, 而 FGA30N120FTD 的关断能量为 141 μ J。

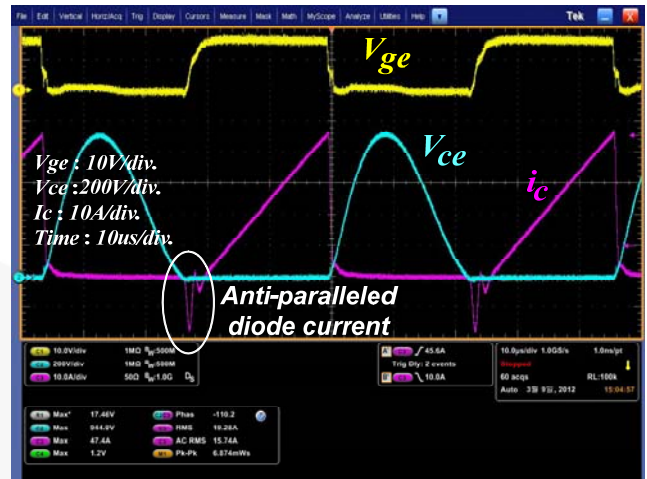


图 7. 工作波形

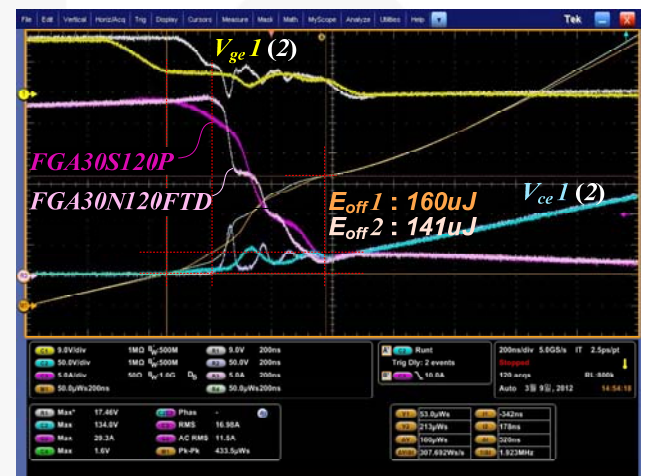


图 8. 开关性能比较

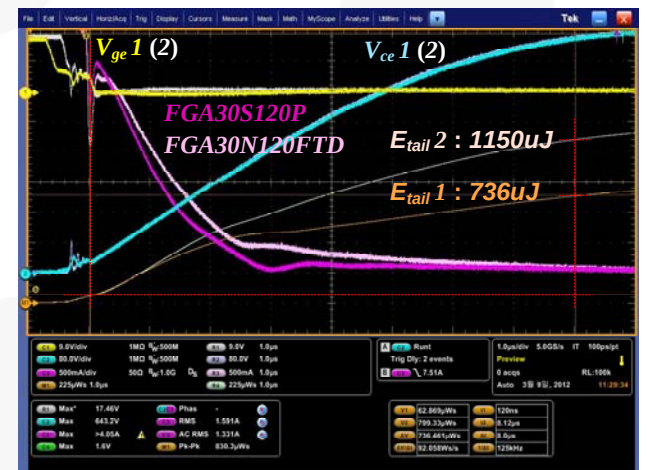
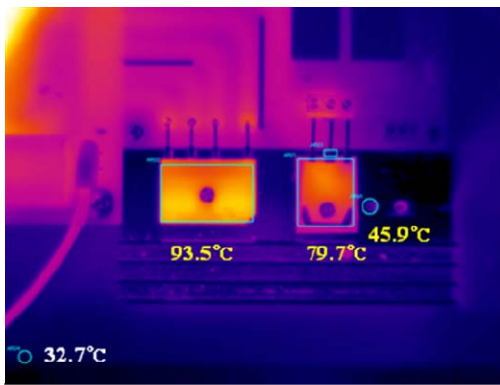
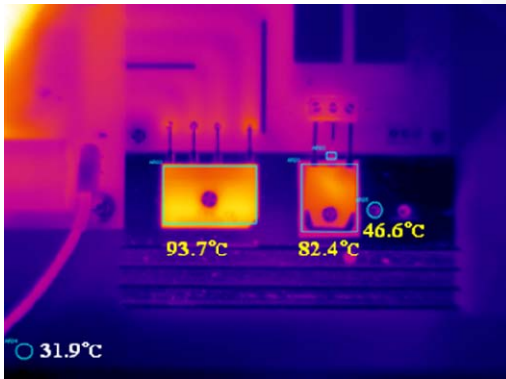


图 9. 尾电流损耗比较



(a) FGA30S120P



(b) FGA30N120FTD

图 10. 热性能比较

从尾电流损耗角度来看, 新器件优于旧版本。图 9 显示尾电流损耗比较。FGA30S120P 的尾电流损耗为 $736 \mu\text{J}$, 而 FGA30N120FTD 的尾电流损耗为 $1150 \mu\text{J}$ 。因此, 尽管新器件会稍微减慢关断过渡过程, 由于较低的 $V_{CE(sat)}$ 和较小的尾电流, 新器件仍能够显著减少总体损耗。

图 10 显示了热性能比较结果。在最大功率 1.8 kW 下, FGA30S120P 的测得壳温为 79.7°C , 而 FGA30N120FTD 的测得壳温为 82.4°C 。虽然新器件包含固有体二极管, 但它表现出来的热性能还是比旧版本要好。

结论

本应用指南介绍了内嵌有类似 MOSFET 的固有体二极管的新型场截止、阳极短路、沟道 IGBT 产品 FS SA T IGBT 并论证了该产品在感应加热应用单端谐振逆变器中的有效性。虽然快速恢复二极管和 IGBT 功能集中到单个芯片中, 但是飞兆半导体的阳极短路硅技术提供比具有相同额定值的 NPT 沟道 IGBT 更低的饱和电压 (最多可低 12.5%) 和更低的尾电流 (最多可低 36%)。

参考文献

- [1] K-H Lee, K-H Oh, Y-C Kim 和 C M Yun, "An Avalanche-Rugged NPT Trench IGBT used in Single-Ended Quasi-Resonant Topology for Induction Heating Appliance" (用于感应加热设备单端准谐振拓扑的雪崩耐用 NPT 沟道 IGBT), EPE 2005
- [2] Laska, T., Munzer, M., Pfirsch, F., Schaeffer, C. 和 Schmidt, T., "The Field Stop IGBT (FS IGBT) - A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential" (场截止 IGBT (FS IGBT) - 具有很大改进潜力的新功率器件概念), ISPSD 2000, 第 355 - 358 页。
- [3] Alessandria, A. 和 Fragapane, L., "A New Top Structure Concept for a Trench-Gate Emitter Implant Field-Stop IGBT" (沟道-栅极发射极植入场截止 IGBT 的新顶部结构概念), SPEEDAM 2010, 第 551 - 555 页。
- [4] D. J. Kessler 和 M. K. Kazimierczuk, "Power Losses and Efficiency of Class-E Power Amplifier at Any Duty Ratio" (E 类功率放大器在任意占空比下的功率损耗和效率), IEEE 会刊 电路系统 I, 注册 论文, 第 51 卷, 第 9 期, 第 1675 - 1689 页, 9 月 2004。
- [5] N-J Park, D-Y Lee 和 D-S Hyun, "Study on the New Control Scheme of Class-E Inverter for IH-Jar Application with Clamped Voltage Characteristics using Pulse Frequency Modulation" (具有箝位电压特性的 E 类逆变器在感应加热锅应用中使用脉冲频率调制的新型控制机制研究), 《Electric Power Applications》, IET 第 1 卷, 第 3 期, 第 433 - 438 页。
- [6] D-Y Lee 和 D-S Hyun, "A New Hybrid Control Scheme using Active-Clamped Class-E Inverter with Induction Heating Jar for High-Power Applications" (在高功率应用感应加热锅中使用有源箝位 E 类逆变器的新型混合控制机制), 《Journal of Power Electronics》, 第 2 卷, 第 2 期, 第 104-111 页, 2002 年 4 月
- [7] J-E Yeon, M-Y Park, K-M Cho 和 H-J Kim, "Field-Stop Shorted-Anode Trench IGBT for Induction Heating Appliances" (用于感应加热设备的场截止阳极短路沟道 IGBT), IECON 2012, 第 422 - 426 页。

附录 – 场截止阳极短路沟道 IGBT

器件型号	内置二极管	BVCES (最小值) [V]	下降时间 (ns, 需 175° C) [ns]	IC (最大值) (A, 需 100° C)	$R_{\theta JC}$ (° C/W)	$V_{GE(sat)}$ (典型值) [V]	$V_{GE(th)}$ (最小值) [V]	封装	代次
FGA50S110P ⁽¹⁾	是	1100	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	T0-3P 3L	第二
FGA15S125P	是	1250	250	15 A @ 100° C	1.10	2.25	4.5	T0-3P 3L	第二
FGA20S120M	是	1200	520	20 A @ 100° C	0.43	1.55	4.5	T0-3P 3L	第一
FGA20S125P	是	1250	250	20 A @ 100° C	0.60	2.00	4.5	T0-3P 3L	第二
FGA25S125P	是	1250	232	25 A @ 100° C	0.60	1.75	4.5	T0-3P 3L	第二
FGH30S130P	是	1300	270	30 A @ 100° C	0.30	1.75	4.5	T0-3P 3L	第二
FGA30S120P	是	1300	270	30 A @ 100° C	0.43	1.75	4.5	T0-3P 3L	第二
FGA20S140P	是	1400	356	20 A @ 100° C	0.55	1.90	4.5	T0-3P 3L	第二

说明:

1. 仍在开发中, 未正式生产。

相关数据表

[FGA15S125P — 1250 V、15 A 阳极短路 IGBT](#)

[FGA20S125P — 1250 V、20 A 阳极短路 IGBT](#)

[FGA25S125P — 1250 V、25 A 阳极短路 IGBT](#)

[FGA30S120P — 1300 V、30 A 阳极短路 IGBT](#)

[FGH30S130P — 1300 V、30 A 阳极短路 IGBT](#)

[FGA20S140P — 1400 V、20 A 阳极短路 IGBT](#)

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

ON Semiconductor and  are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba ON Semiconductor or its subsidiaries in the United States and/or other countries. ON Semiconductor owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of ON Semiconductor's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. ON Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. ON Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does ON Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using ON Semiconductor products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by ON Semiconductor. "Typical" parameters which may be provided in ON Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. ON Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. ON Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use ON Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold ON Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that ON Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part. ON Semiconductor is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada

Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910

Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local
Sales Representative