

# 软磁铁氧体材料市场及技术的发展

天通控股股份有限公司材料研究所

李小龙，邢冰冰，王鑫，张强源，陈诚海

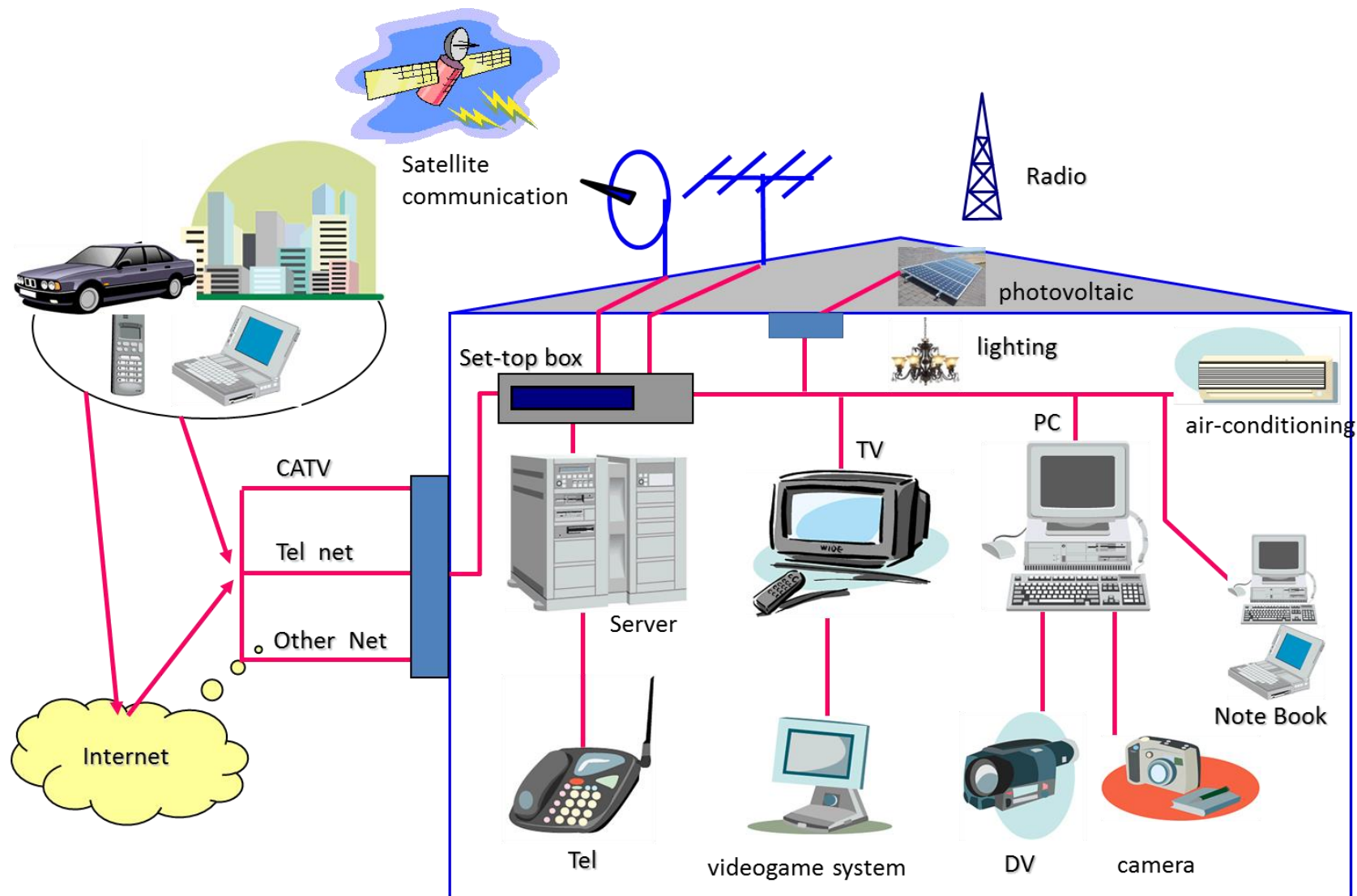
2018.07.27

# 报告内容：

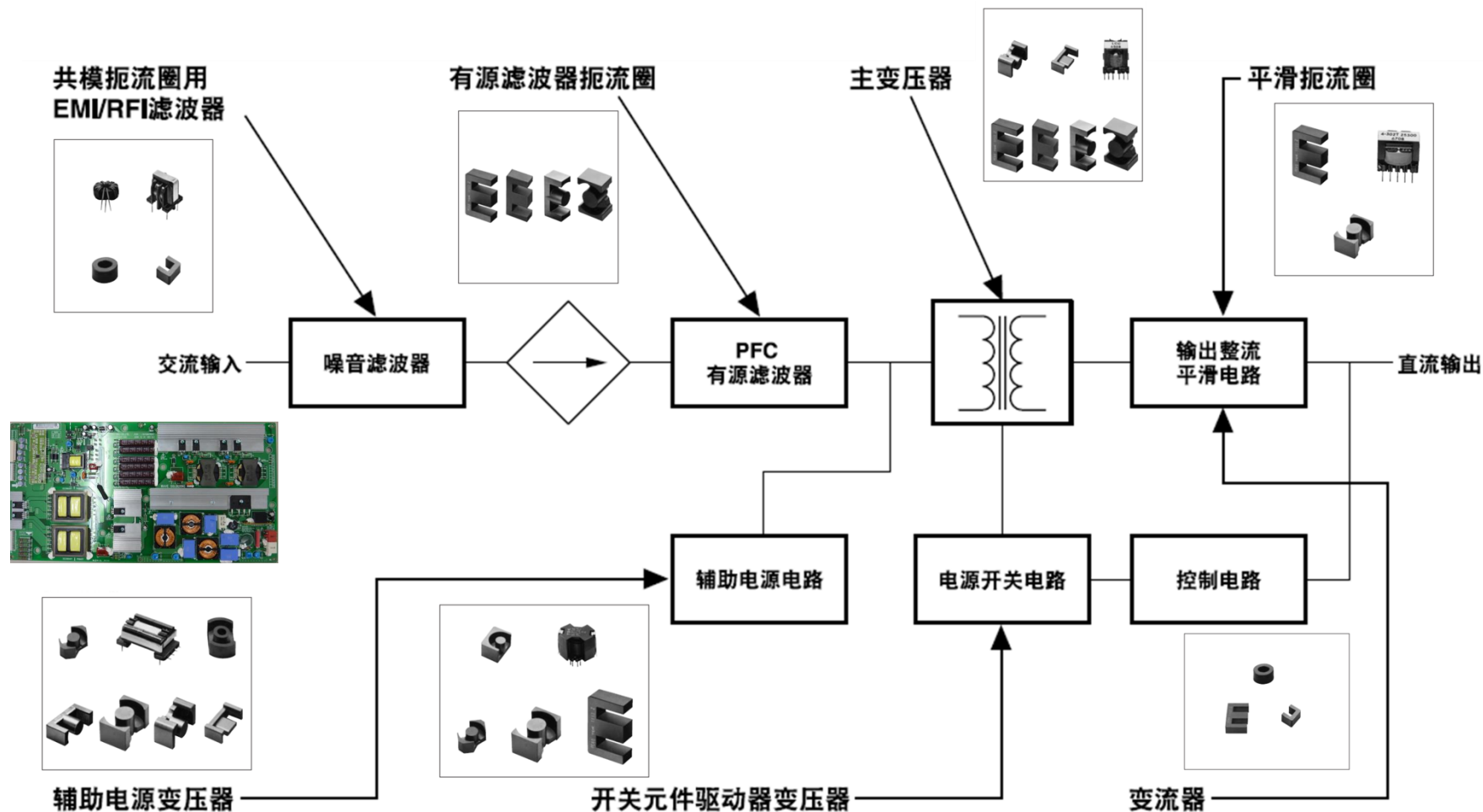
1. 软磁材料的应用
2. 应用市场的新动向
3. 铁氧体软磁材料发展的动向
4. 软磁材料发展方向的思考
5. 总结

# 1.软磁性材料的应用

## 1.1 广泛的应用

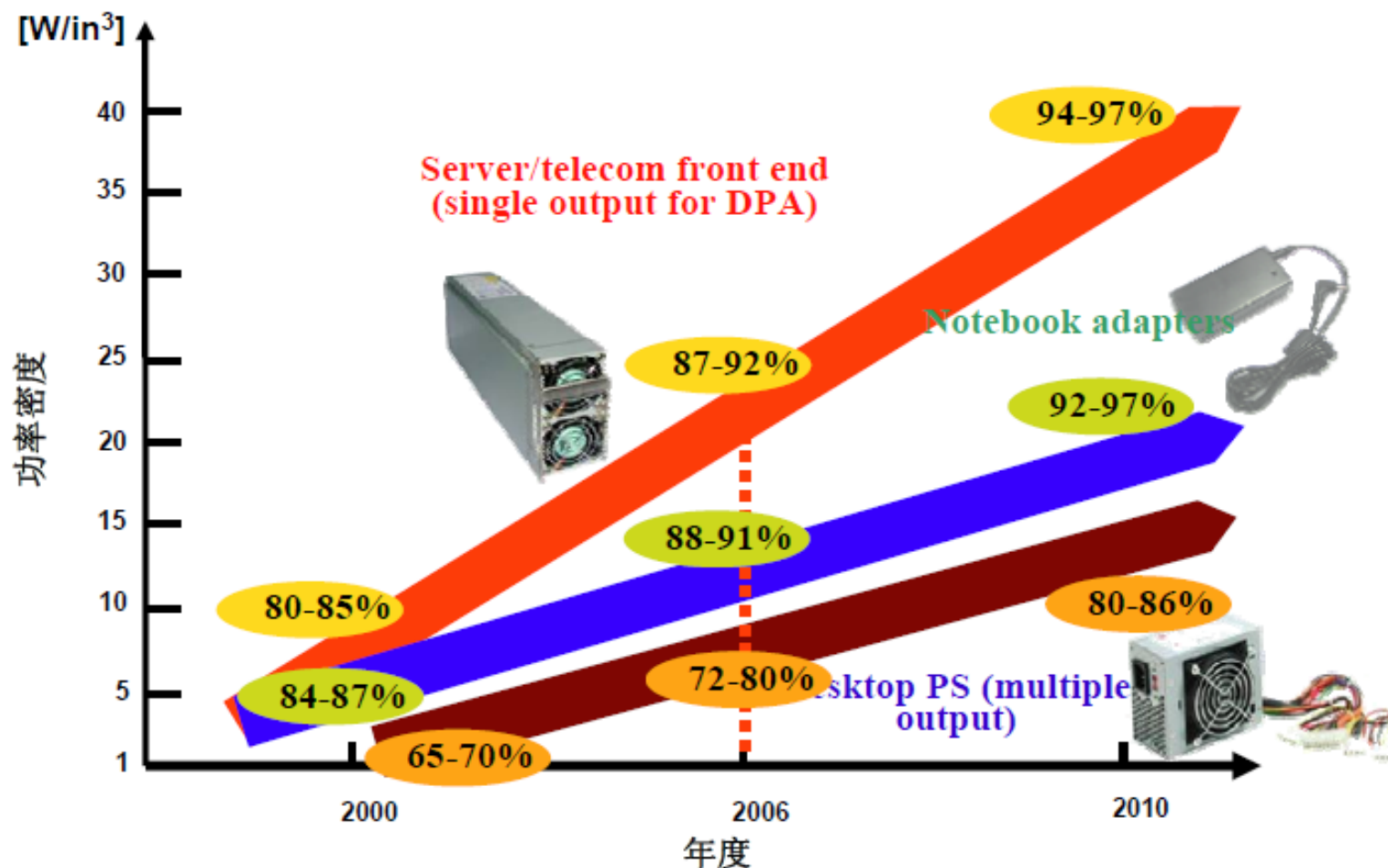


# 1.2 在功率变化器中的典型应用



# 1.3 功率变化器发展的趋势

\*资料来源：陈为 电力电子功率变化器与磁性材料



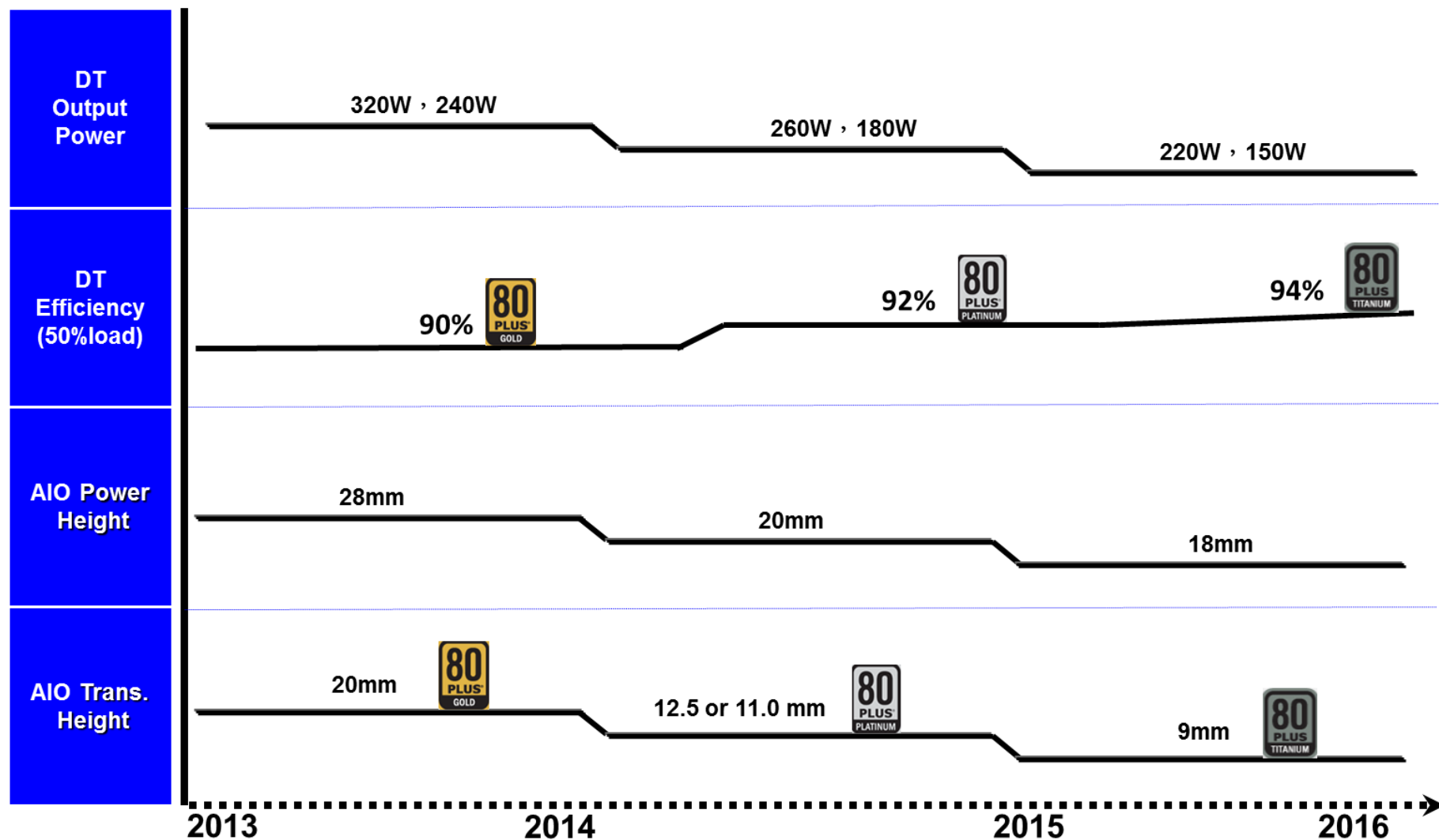
高效率和高功率密度是功率变化器发展的两个永恒的趋势

# 例1：80PLUS认证对高效率的追求

						
	白牌	铜牌	银牌	金牌	白金牌	钛金牌
负载	转换效率					
10%	\	\	\	\	\	90%
20%	80%	82%	85%	87%	90%	94%
50%	80%	85%	88%	90%	92%	96%
100%	80%	82%	85%	87%	89%	91%

功率转化器效率的提升是节省能源的关键，随着节能意识和技术的进步，功率转化器对效率的要求越来越高，而且对低负载的也提出了新的要求。

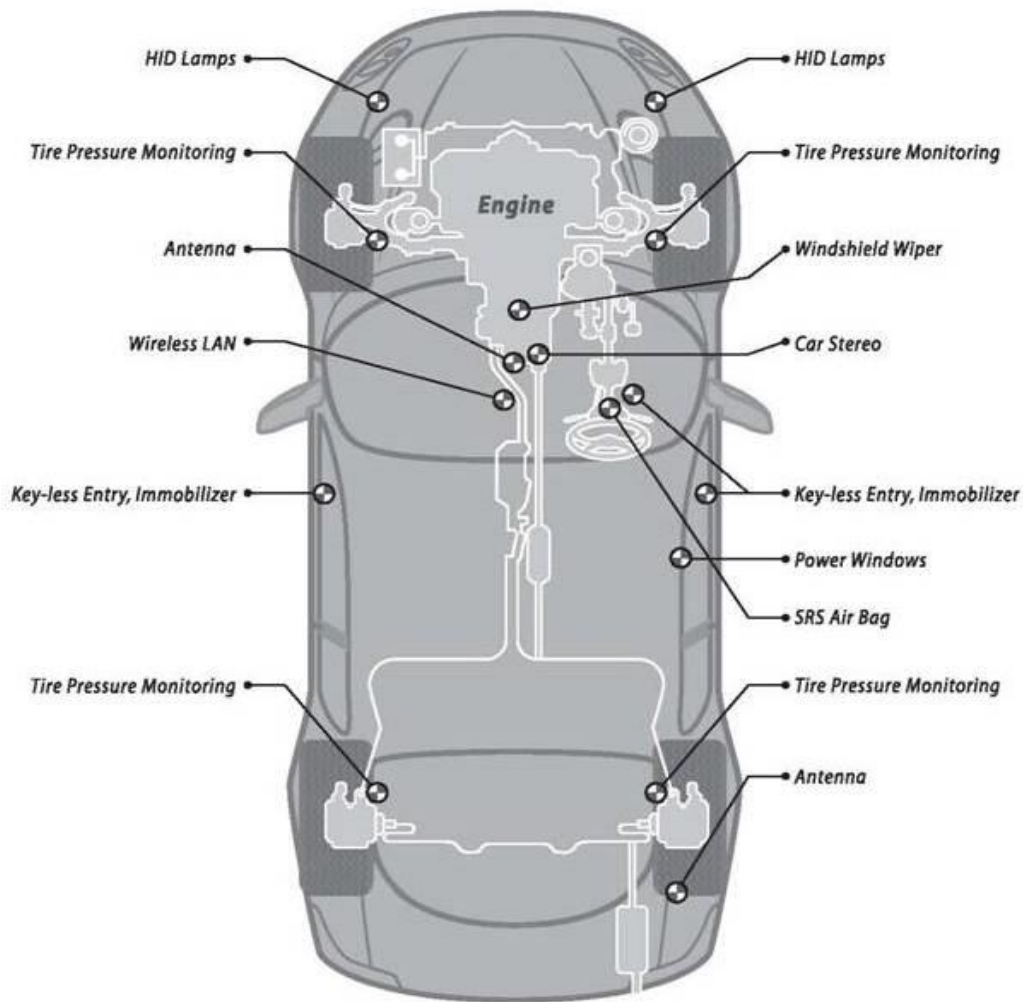
## 例2：某企业元器件近几年磁元器件的发展



高效率 and 小型化是实际产品发展的方向

## 2.应用市场的新动向

### 2.1 新能源汽车



磁性材料及其磁元件在传统汽车中已经有广泛的应用

#### 功率磁性元件



#### 射频电感



#### EMI/RFI 滤波器

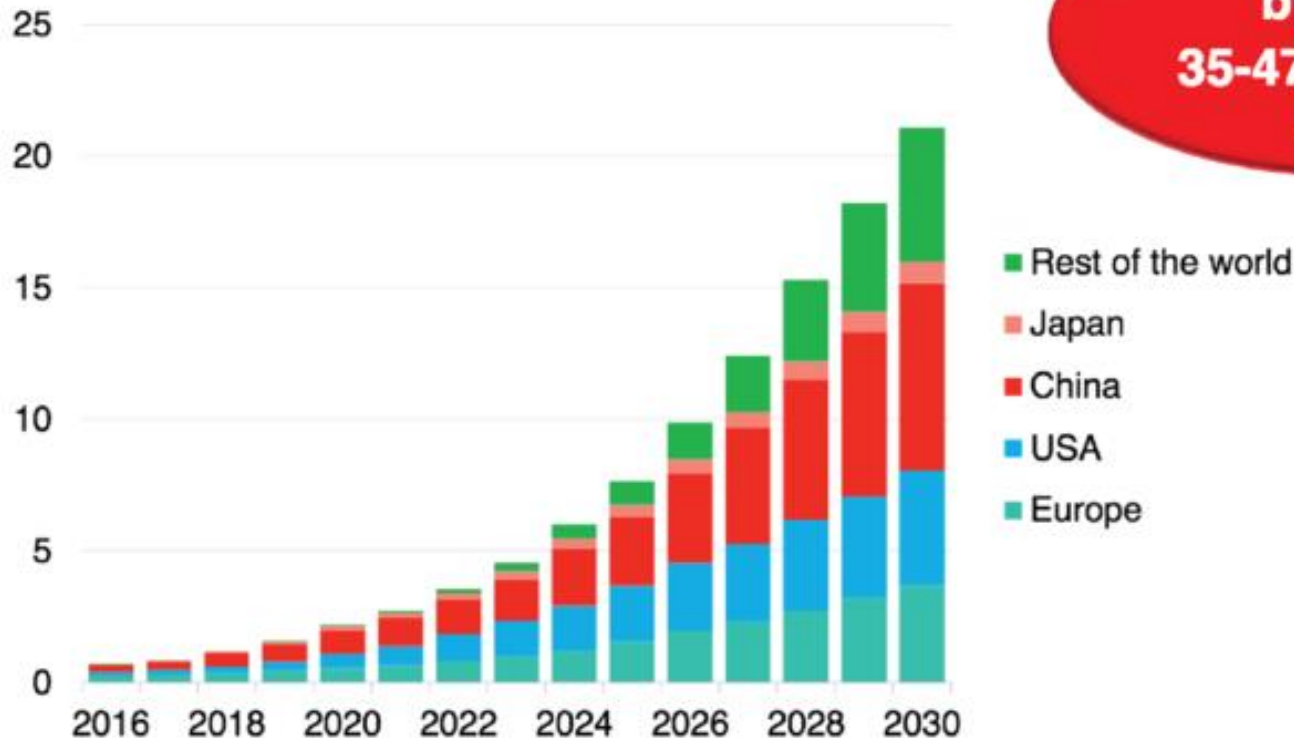




# The Rise of Electric Cars

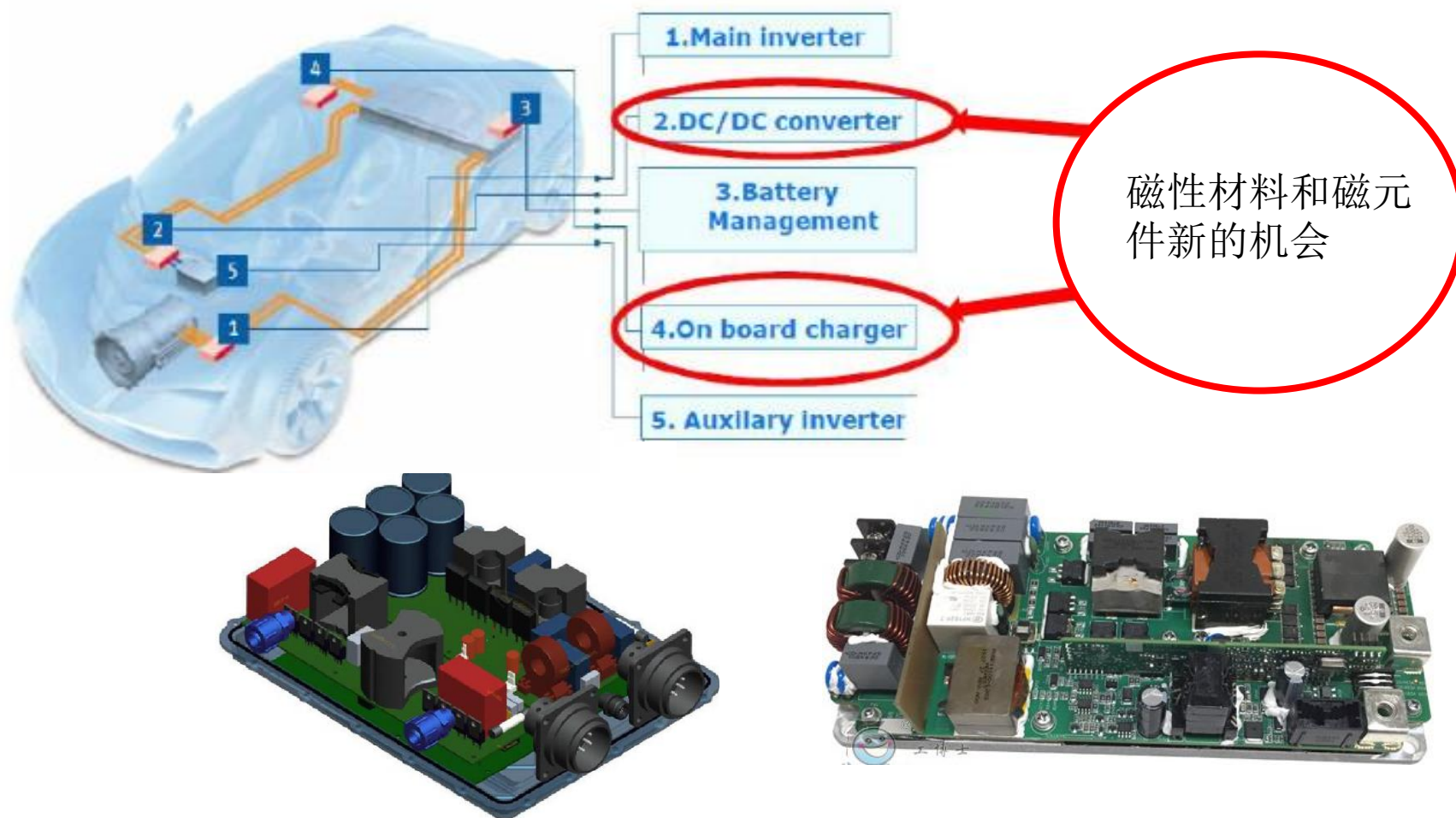
BNEF sees more than 20 million sales by 2030

Millions



**EV penetration  
by 2040  
35-47% of new  
cars**

新能源汽车（电动汽车）是未来汽车发展的重要方向，据预测2030年将达到年产2000万辆的产量。



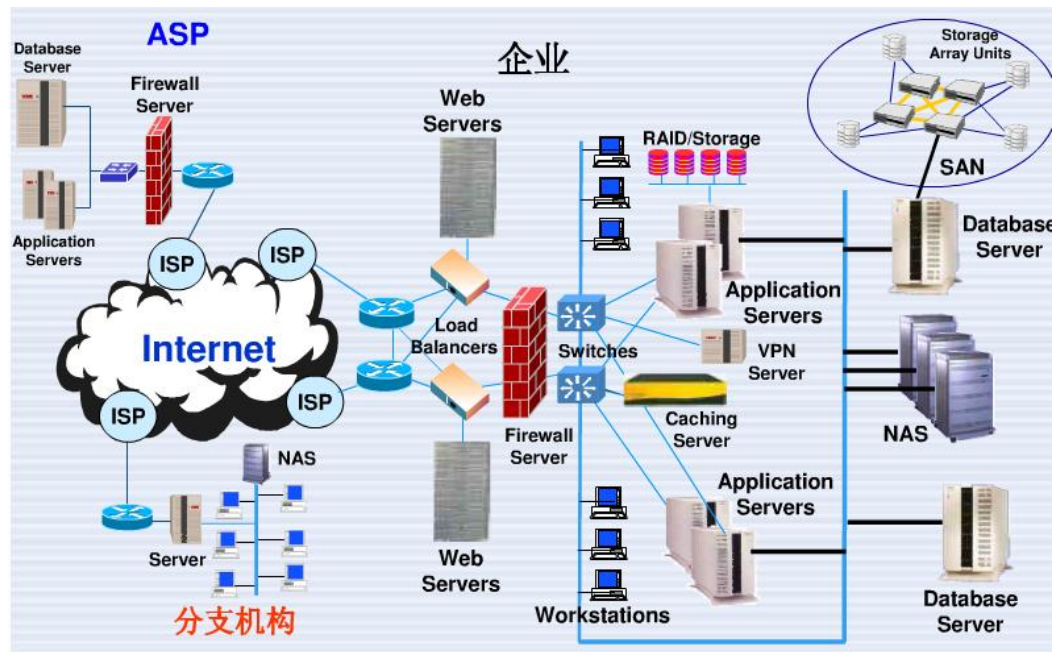
- 电动汽车中，车载充电器（OBC）和DC-DC转化器中，需要使用大量的磁性材料和磁元件。
- 因汽车使用环境严苛和对转化效率的要求，功率类磁性材料和磁元件要求宽温高温损耗低，而EMI用磁材要求具有高的居里温度。

## 2.1 新能源汽车

器件功能		EMI		PFC电感	谐振电感	主变压器	输出扼流电感
		共模电感	差模电感				
常用材质		铁氧体高导、非晶	MnZn铁氧体、粉心	MnZn铁氧体、粉心	MnZn铁氧体	MnZn铁氧体	MnZn铁氧体、粉心
常用磁心		T30~T60	T30~T60 PQ40~PQ50	T30~T60 PQ40~PQ50	PQ40~PQ50, EE55, ER32	PQ40~PQ50, EE55, ER32~40	PQ40~PQ50, EE55, ER32
器件数量	3.3kW OBC	1	1	1	1	1	1
	6.6kW OBC	1~2	1~2	2	2	2	2
	DC-DC模块	0	0	0	1	1	1
磁材需求 (万PCS)	2018 (3.3kW)	150	150	150	300	300	300
	2019 (6.6kW)	400	400	400	600	600	600
	2020 (6.6kW)	500	500	500	750	750	750

软磁产品按照平均未税50RMB/辆计算,2018年电动汽车用软磁材料将超过1.5亿RMB,2019年将达到2亿RMB; 2020年约3.75亿RMB,到2030年将超过10亿RMB

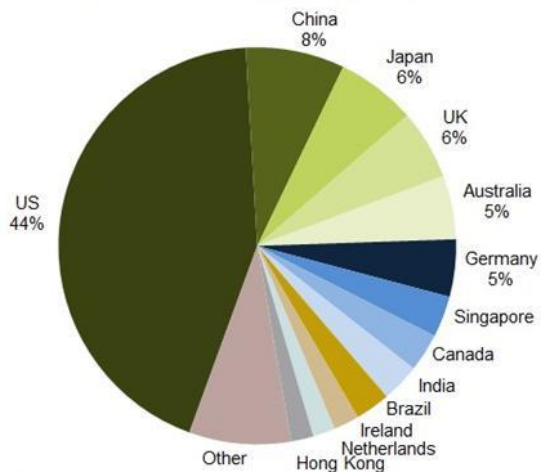
## 2.2 服务器市场



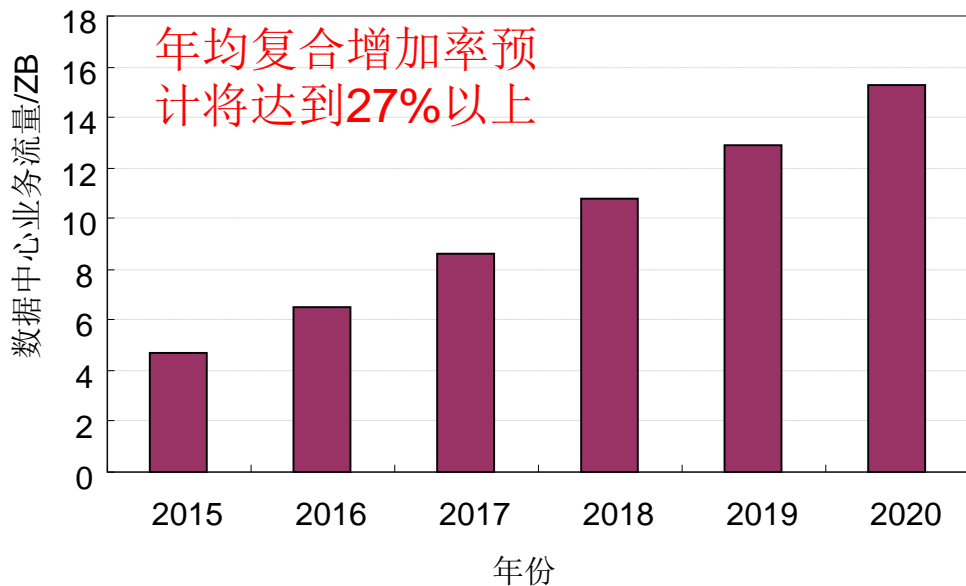
随着5G通讯的应用，物联网，大数据，云计算时代真正来临。其中关键的服务器市场将迎来大增长。

### Hyperscale Data Center Operators

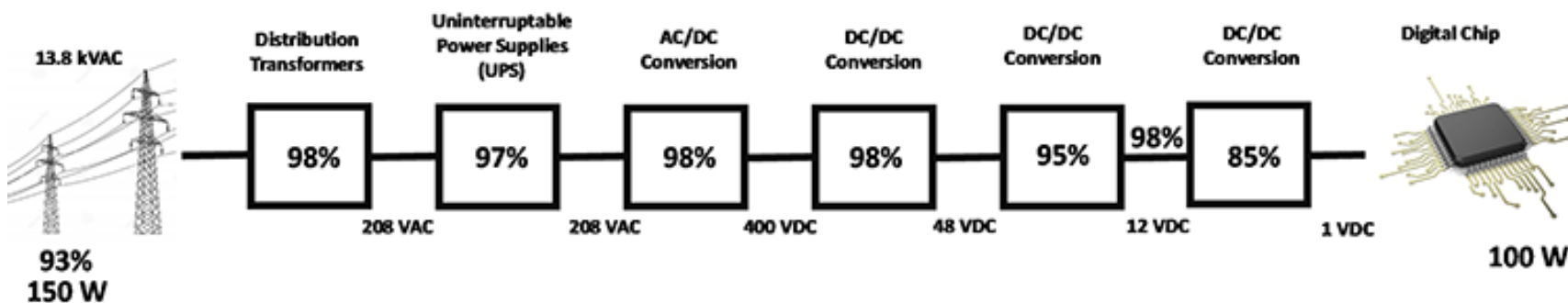
Data Center Locations by Country - December 2017



Source: Synergy Research Group



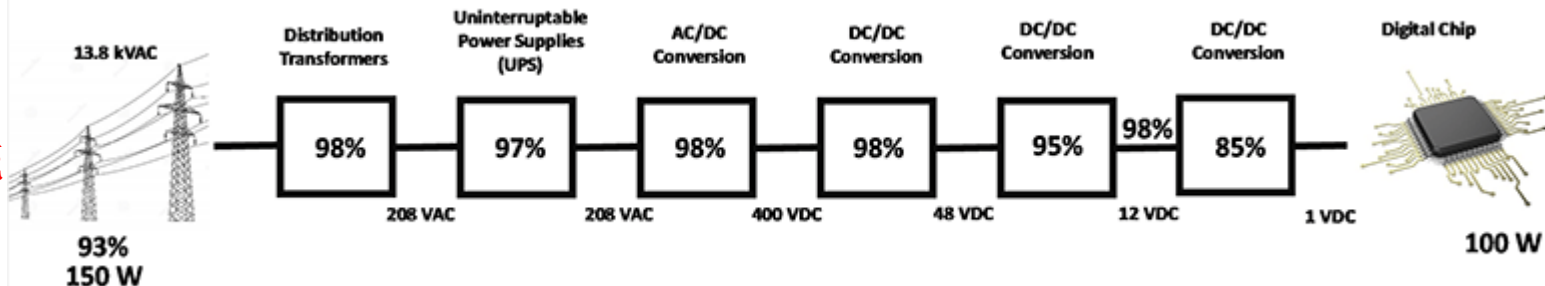




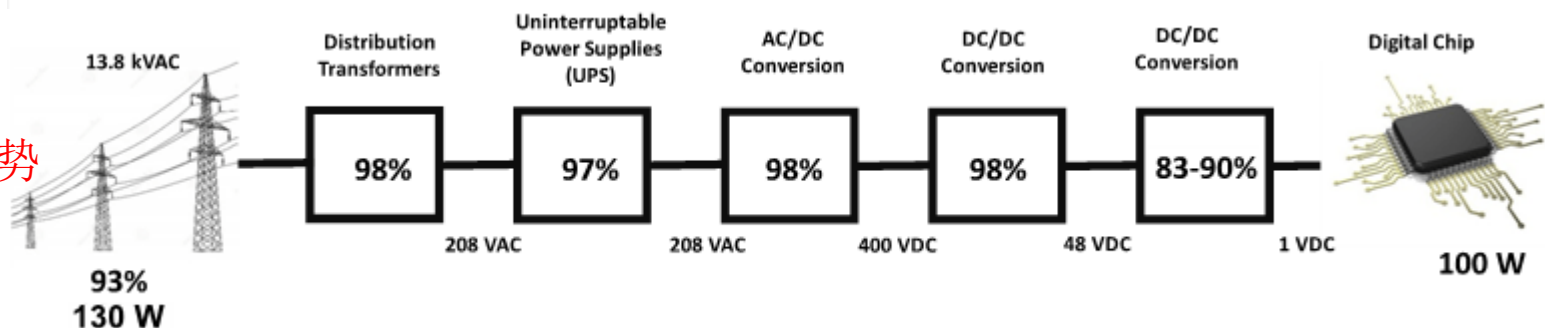
服务器电源覆盖了UPS电源，一次AC-DC电源，二次，三次DC-DC电源和芯片供电电源，基本代表了电源技术发展趋势。

# 服务器电源技术趋势1

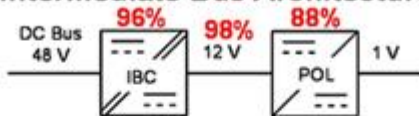
传统



新趋势



## Intermediate Bus Architecture

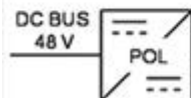


$f_{sw}=300\text{ kHz}$  550 W/in<sup>3</sup>  $f_{sw}=1\text{ MHz}$  500 W/in<sup>3</sup>

$96\% \times 98\% \times 88\%$   
 $\approx 83\%$   
 $\approx 250\text{ W/in}^3$

## DC Bus Architecture

Transformer Based Converter (Courtesy of TI)



$f_{sw}=600\text{ kHz}$

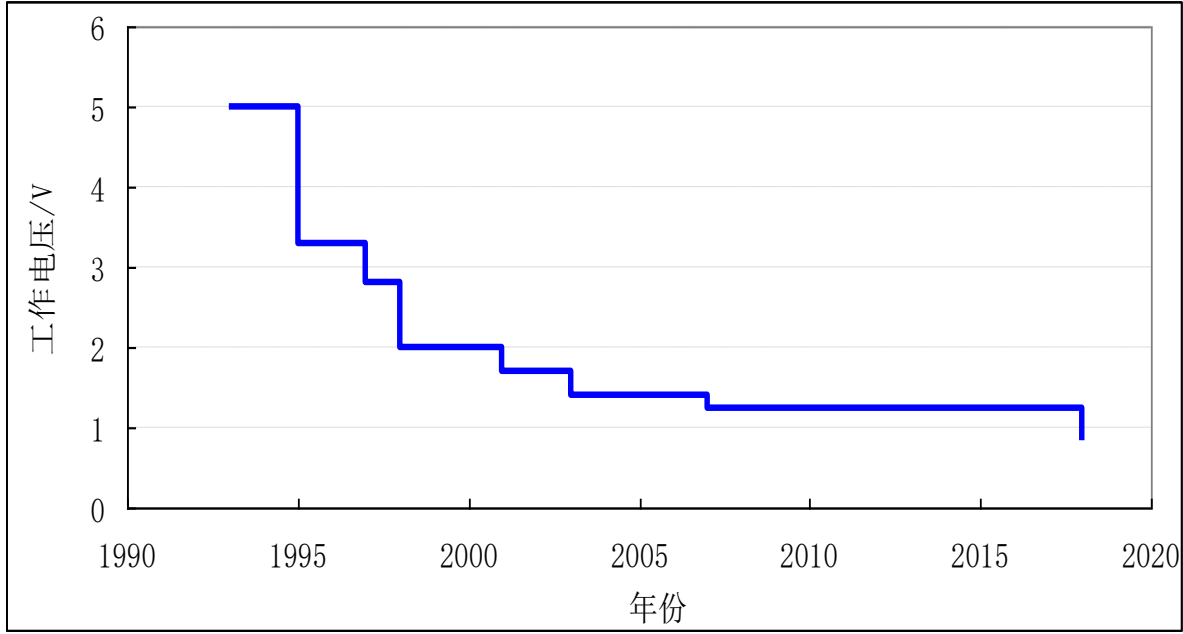
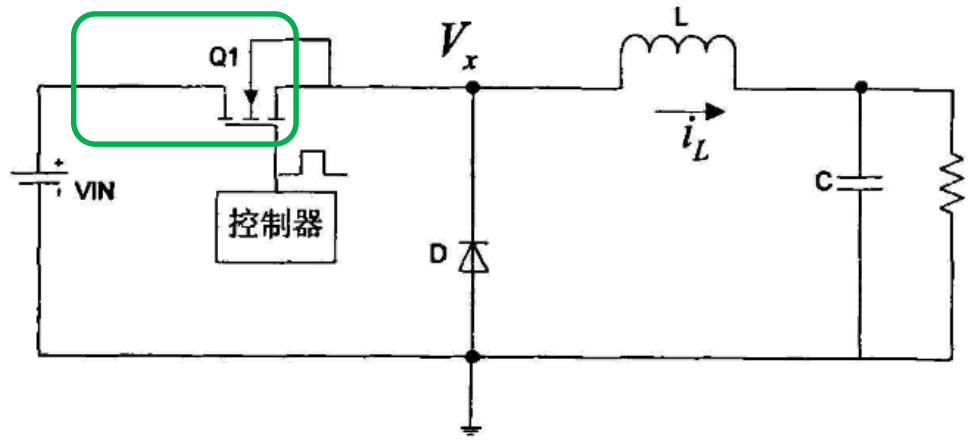
Buck Converter



$f_{sw}=300\text{ kHz}$

$\approx 83\%$   
 $\approx 300\text{ W/in}^3$

Parameter	Units	48 V <sub>IN</sub> IBA		48 V <sub>IN</sub> Direct Conversion	
		48 V <sub>IN</sub> - 12 V <sub>OUT</sub> IBC	12 V <sub>IN</sub> - 1 V <sub>OUT</sub> POL	48 V <sub>IN</sub> - 1 V <sub>OUT</sub> Buck Based	48 V <sub>IN</sub> - 1 V <sub>OUT</sub> Transformer Based
Stage Switching Frequency	kHz	300	1000	300	600
Total Power Devices <sup>a</sup>		32		32	60
System Isolation		Yes		No	No
PCB Complexity		High	Low	Low	High
Stage Efficiency	%	96	88	83	90
Bus Efficiency	%	98		99.9	99.9
Total System Efficiency	%	82.8		82.9	89.9
Stage Power Density	W/in <sup>3</sup> (W/cm <sup>3</sup> )	550 (34)	500 (31)	300 (18)	80 (5)
Total System Power Density	W/in <sup>3</sup> (W/cm <sup>3</sup> )	250 (15)		300 (18)	80 (5)
Total System Cost		Higher		Low	Highest

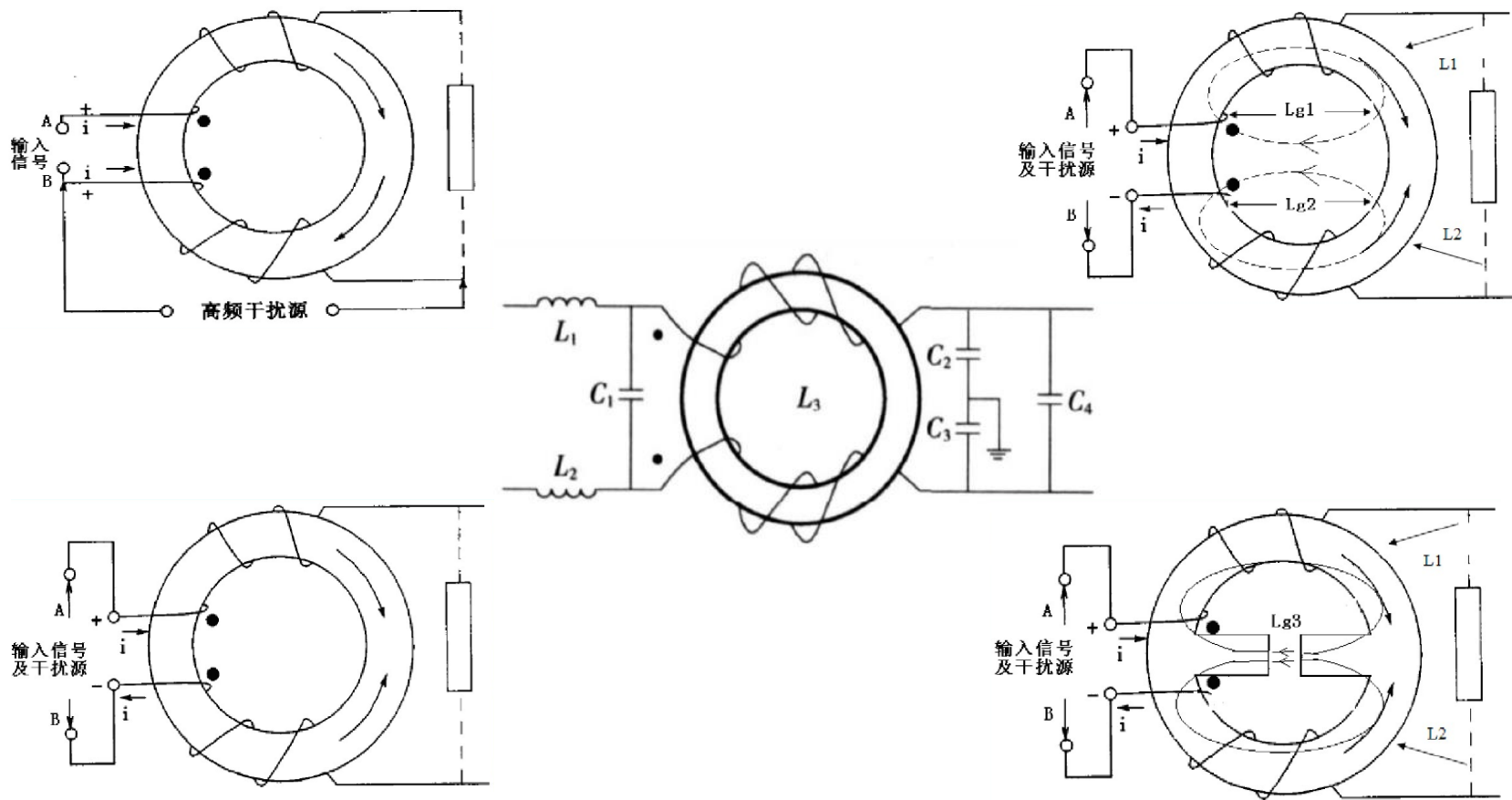


$I=P/V$

以CPU为代表的芯片供电电路，输出电压越来越低电流越来越大  
→材料具有高频高饱和磁通密度

※Intel CPU介绍资料

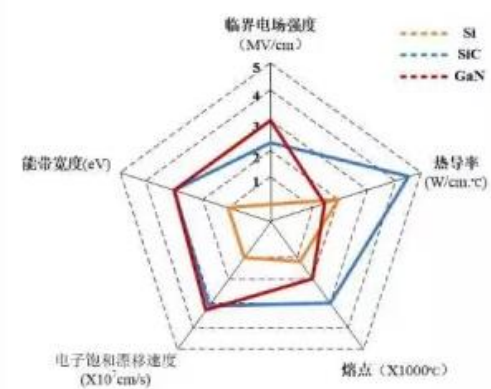
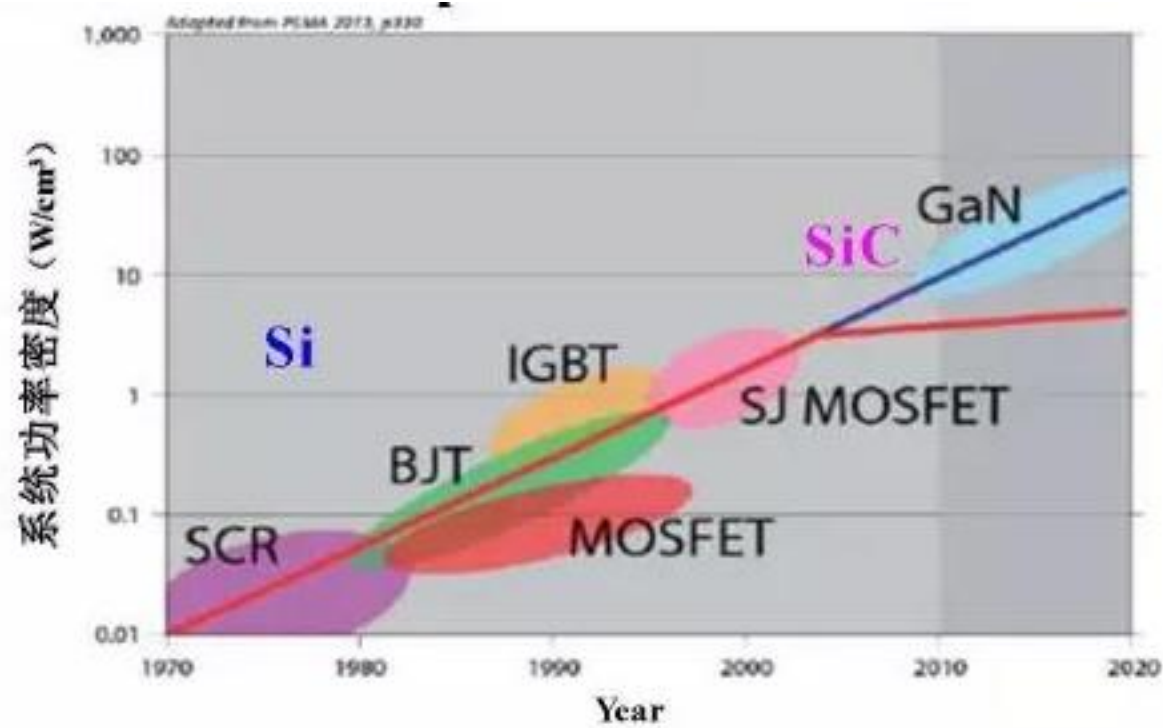
## 2.3 集成差共模电感



随着功率转化器功率密度的提升，目前越来越多的设计方案采用集成差共模的**EMI**滤波方式。要求磁性材料具有高频高磁导率，同时具有高耐直流叠加特性。

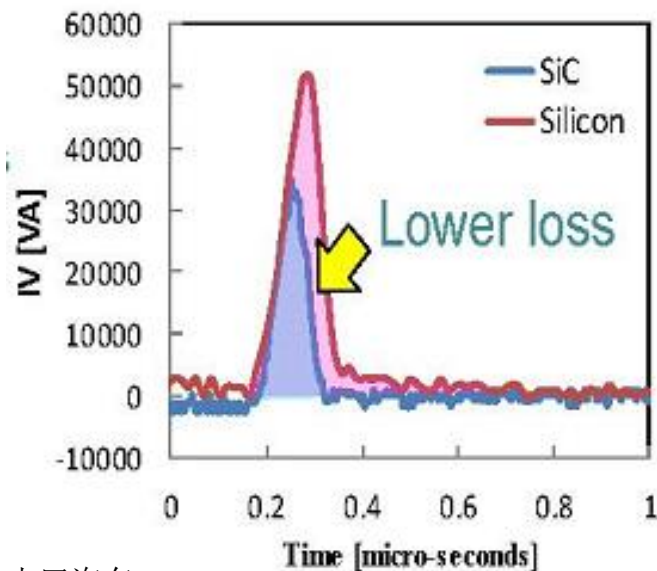
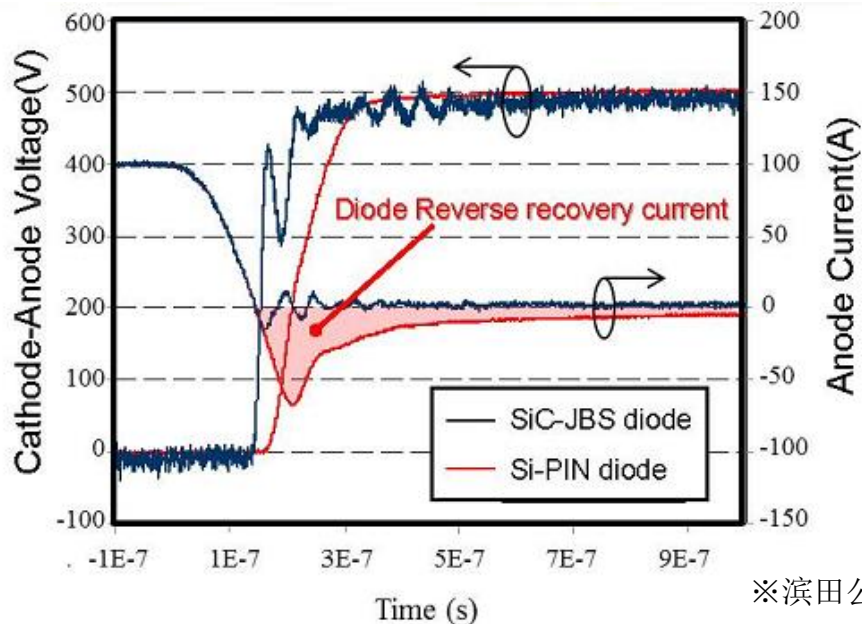


## 2.4 第三代半导体材料



	Si	GaN	SiC	性能
能带隙	1.1eV	3.4eV	3.3eV	高温工作
临界电场强度	0.3MV/cm	3.0MV/cm	2.0MV/cm	高耐电压, 大电流密度
饱和漂移速度	$1.0 \times 10^7 \text{cm/s}$	$2.5 \times 10^7 \text{cm/s}$	$2.0 \times 10^7 \text{cm/s}$	高开关频率

## 2.4 第三代半导体材料

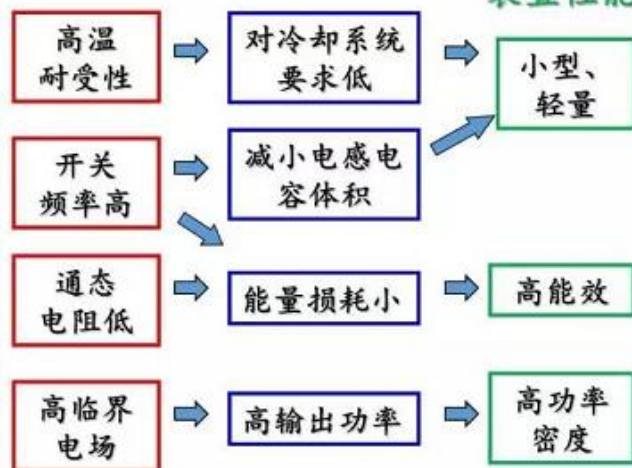


※滨田公守, 丰田汽车

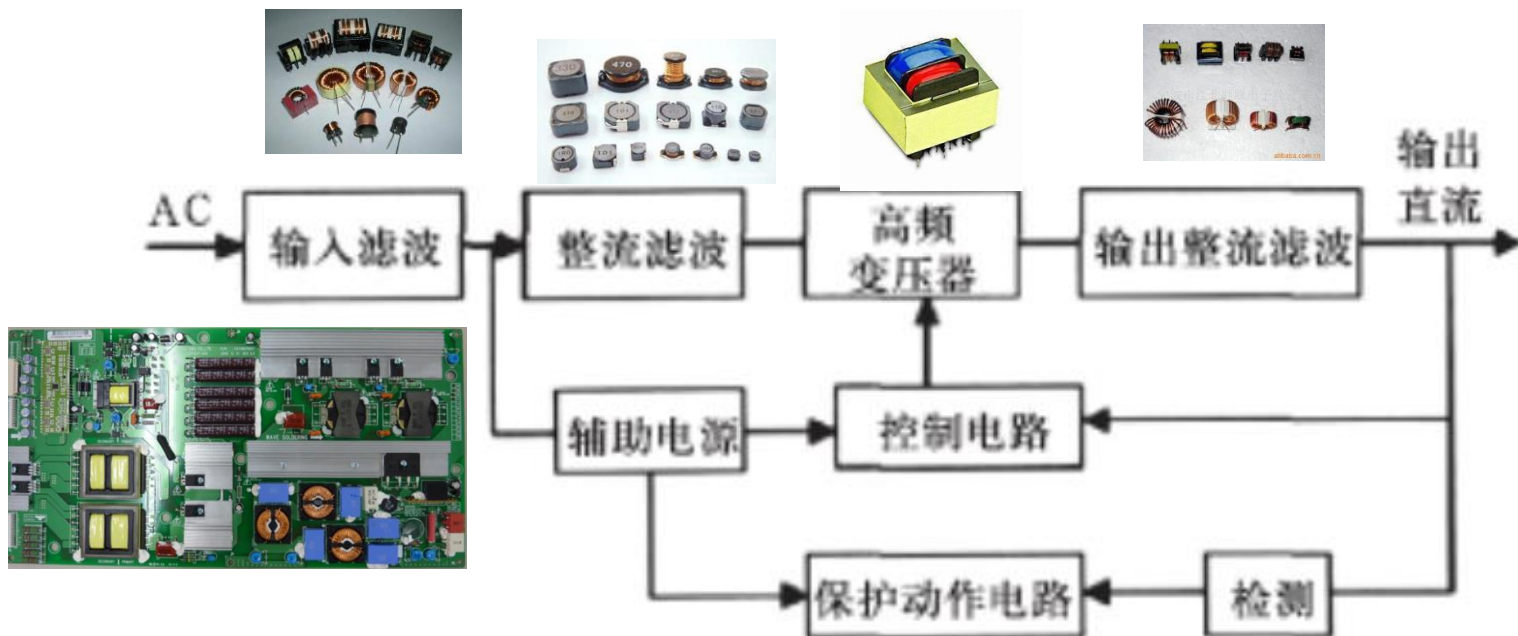


### 材料性能

### 功率电子 装置性能



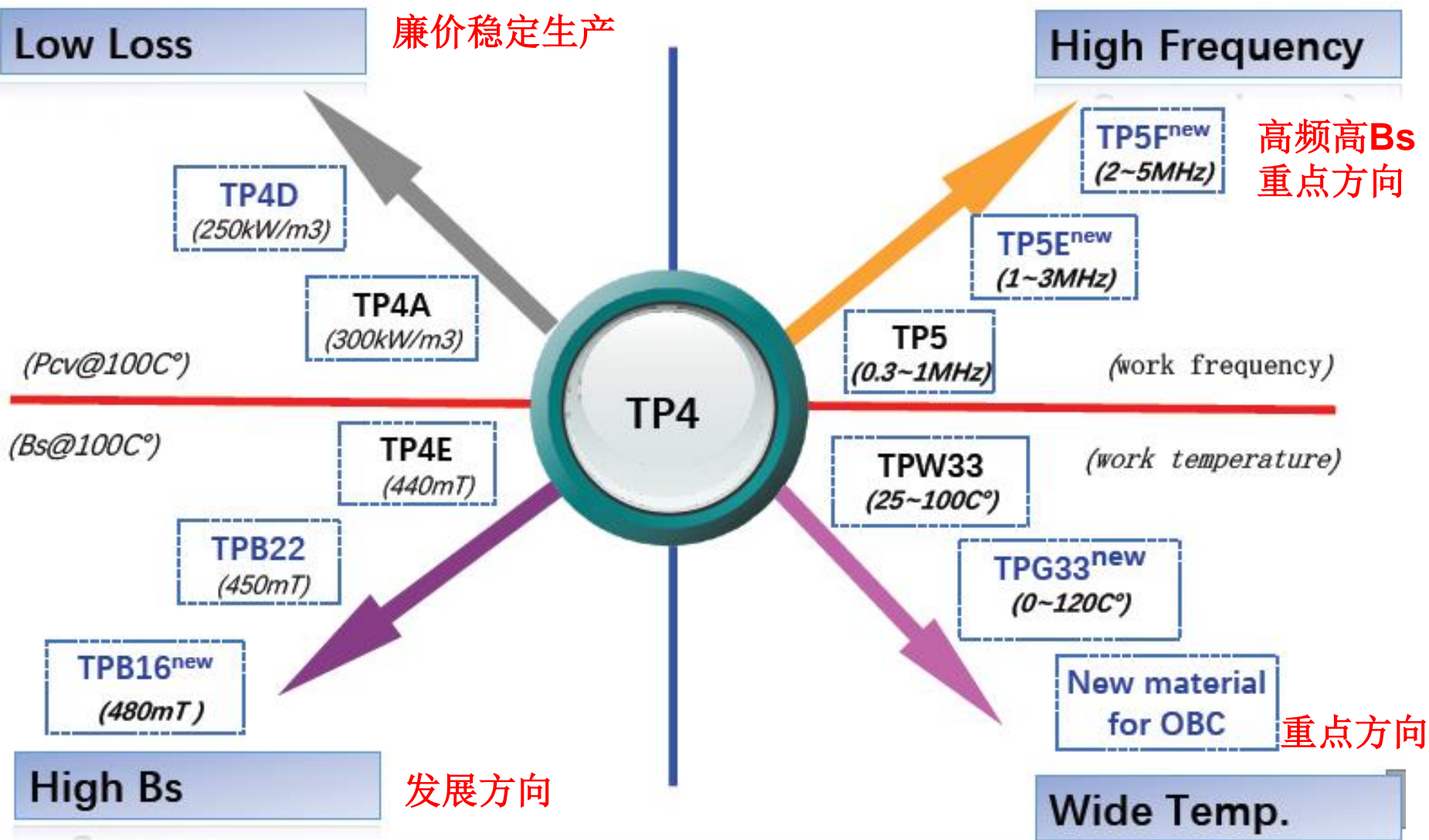
## 2.5 新市场对材料磁性材料的要求



功率变化器趋势	磁性材料	应用	特性要求	磁心要求	价格要求
高转化效率 高功率密度 高开关频率 抗电磁干扰	MnZn功率材	变压器 PFC电感 谐振电感 等	宽温低损耗	小型 薄型 高强度 高耐热冲击 高精度	廉价化
			高温低损耗		
			高频低损耗		
			高Bs		
	MnZn高导材	功率电感 EMI电感 等	高频高磁导率		
			高频高阻抗		
			抗直流叠加		
	NiZn铁氧体	功率电感 EMI电感 等	高Bs, 大电流		
			耐高温		
			高强度		

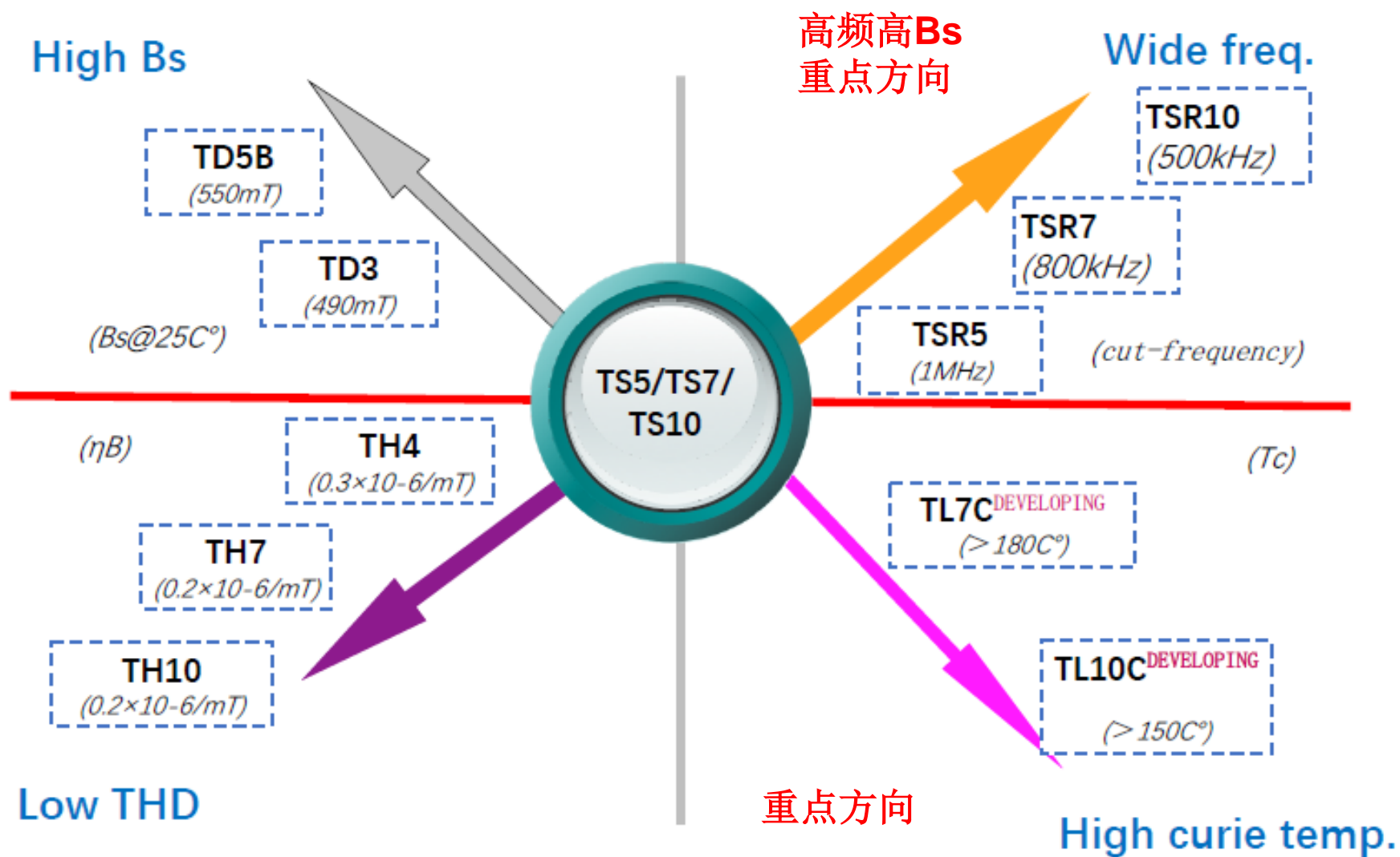
### 3.铁氧体软磁材料发展的动向

#### 3.1 功率类铁氧体发展方向

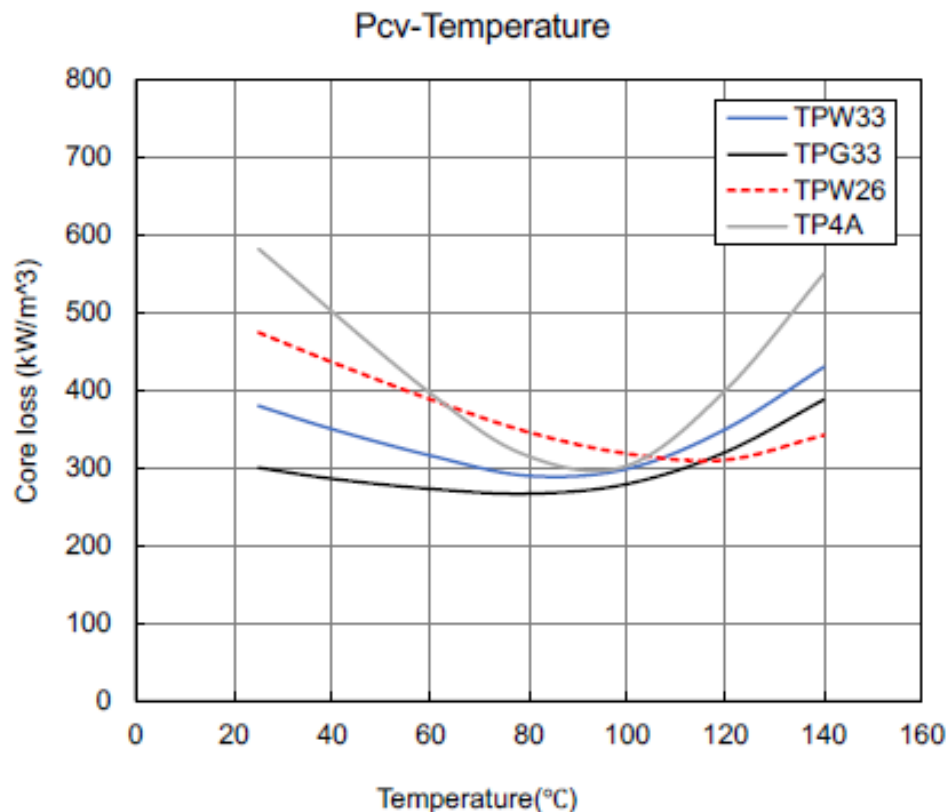




## 3.2 高导类铁氧体发展方向



### 3.3 宽温低损耗铁氧体介绍



Pcv @ f=100kHz,B=200mT				
	25°C	100°C	120°C	140°C
TP4A (44 material)	600	300	400	550
TPW33 (95 material)	380	300	350	450
TPG33 <sup>*NEW</sup> (96 material)	340	270	315	400
TPW26 (97 material)	--	320	310	350

<sup>\*DEVELOPING</sup>

- 为对应高转化效率的要求，宽温低损耗的材料是功率材发展的方向，目前比常规TPW33宽温低损耗材料低10%左右损耗的新材料开始成为新的宽温低损耗材主力；
- 为了对应高温应用领域，宽温低损耗材损耗最低点往高温移动，140℃损耗需要更低

### 3.4 高频高Bs系列材料介绍

			TP5	TP5B	TP5E	TP5F
Permeability		25°C	1400±25%	1200±25%	1200±25%	900±25%
μi						
flux density	F=1kHz	25°C	470	510	520	510
Bs(mT)	H=1194A/m	100°C	380	410	420	430
Core loss	F=500kHz	25°C	130	150	100	80
Pcv	B=50mT	100°C	80	100	60	50
(kW/m <sup>3</sup> )	F=1MHz	25°C	300	250	150	50
	B=30mT	100°C	150	100	80	30
	F=1MHz	25°C	600	700	500	200
	B=50mT	100°C	500	500	300	150
	F=3MHz	25°C	3000	2500	2200	550
	B=30mT	100°C	2000	1800	1300	500
	F=5MHz	25°C	1500	1300	1000	150
	B=9mT	100°C	2000	1200	800	150

为了高功率密度的发展，高频材可应用频率目前达到了1~3MHz。使用频率往高发展的同时，材料叠加特性，即饱和磁通密度也要求越来越高。

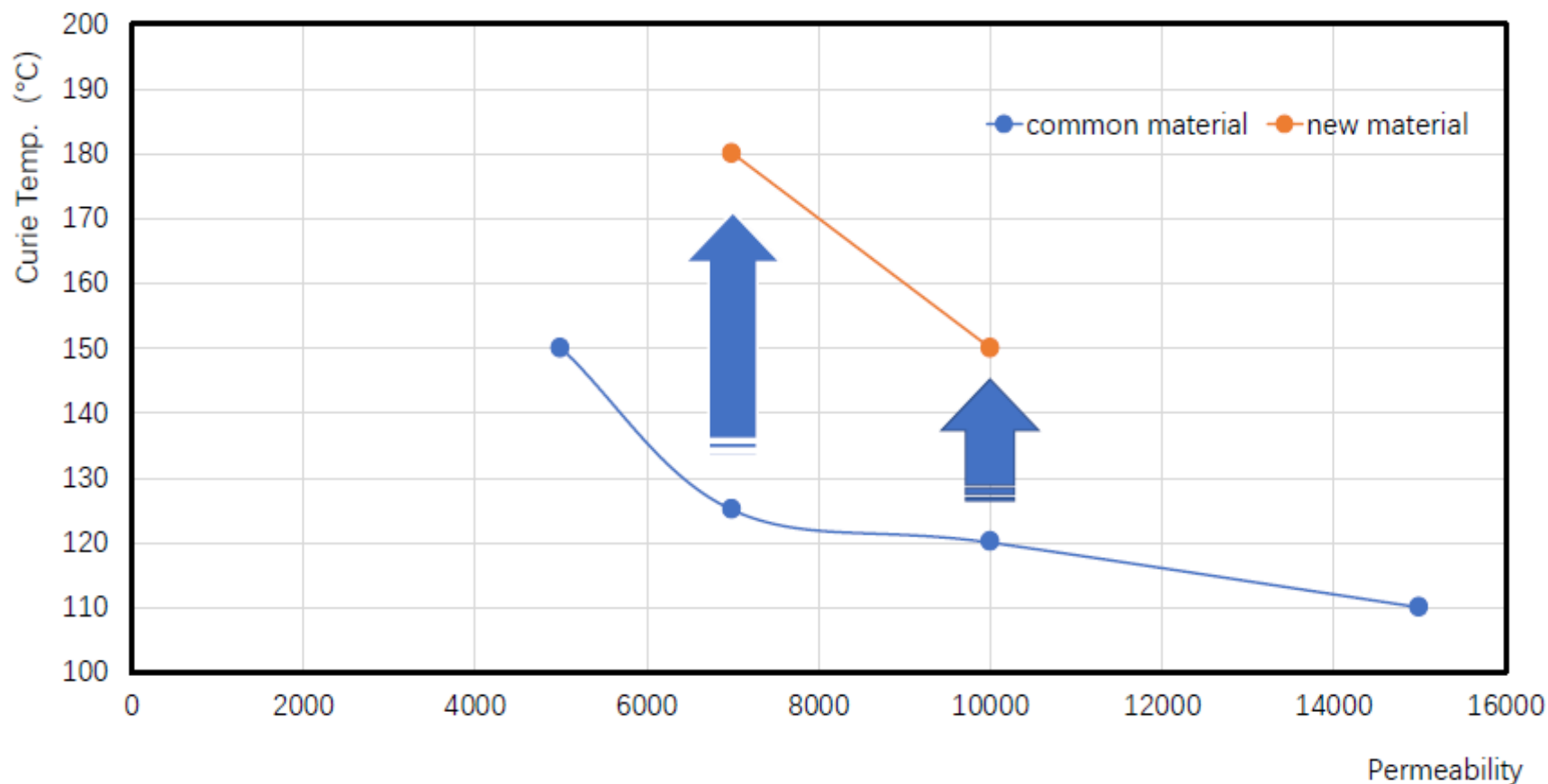
### 3.4 高频高Bs系列材料介绍

测试条件			TP5F	PC200
f	B	T	P <sub>cv</sub> /kwm-3	
500kHz	50mT	100℃	40	60
700kHz	50mT	100℃	62	100
1MHz	50mT	100℃	107	180
2MHz	30mT	100℃	85	200
3MHz	10mT	100℃	28	60
3MHz	30mT	100℃	222	800

针对GaN开关管，TDK公布了最新2~3MHz下应用的PC200材料。  
我司的TP5F材在各频率段和PC200比较，损耗均具有较明显的优势。



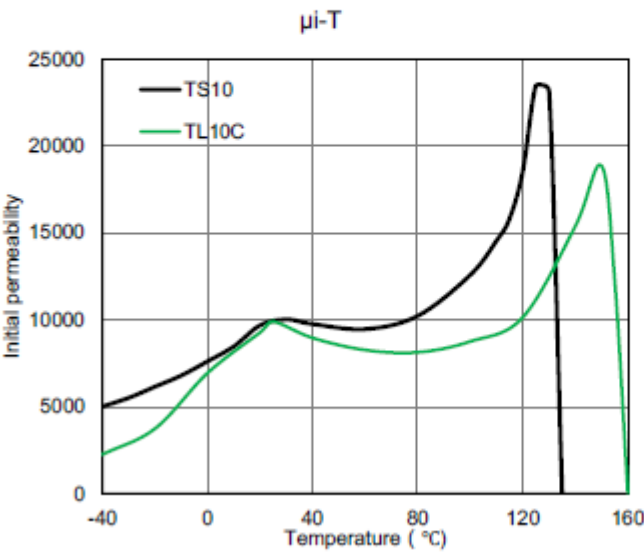
### 3.5 高导高Tc材料发展介绍



- 对于汽车，工业应用等领域，使用温度比一般常规领域高，需要高磁导率材料具有高的居里温度。
- 10k材Tc普遍要求高于150度，甚至160度以上，7k材Tc要求达到180℃以上。

# 3.5.1 10K高Tc材料介绍

Tc is increase from 125°C to 150°C.



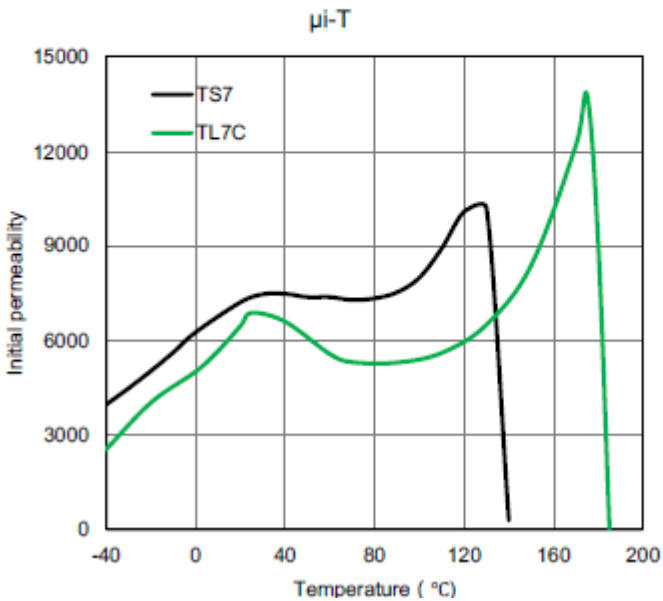
			TL10C	TS10
Initial permeability	$\mu_i$	25C° 10kHz	10000±30%	10000±30%
flux density	Bs(mT)	25C°	440	380
Relative loss factor	$\tan\delta/\mu_i(\times 10^{-6})$	25C°100kHz	< 30	< 30
Relative temperature coefficient	$\alpha_{\mu ir}(\times 10^{-6}/C^{\circ})$	20C°~60C°	-1.0~2.0	-0.5~2.0
Curie temperature	Tc(C°)		≥150	≥125
Electrical resistivity	( $\Omega\cdot m$ )		0.1	0.2
Density	d(kg/m <sup>3</sup> )		4.9×10 <sup>3</sup>	4.9×10 <sup>3</sup>

- 保持 $\mu_i=10000$ 不变的情况下，TC提高到150度以上，目前正在往160度以上开发
- 高Tc导致饱和磁通目的较常规材Bs显著提升，对增加抗叠加特性有利
- 温度特性有一定的恶化

# 3.5.2 7K高Tc材料介绍



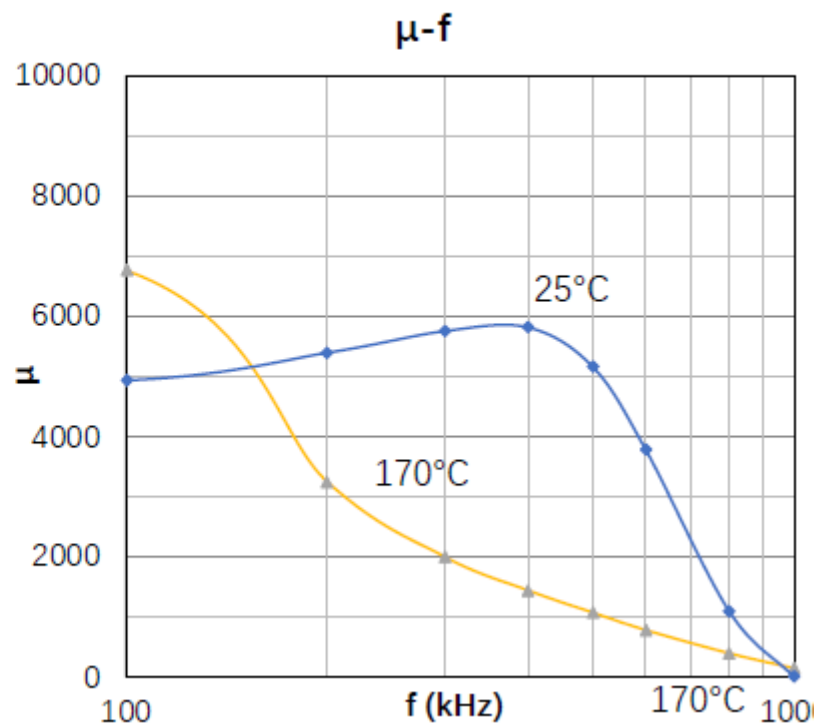
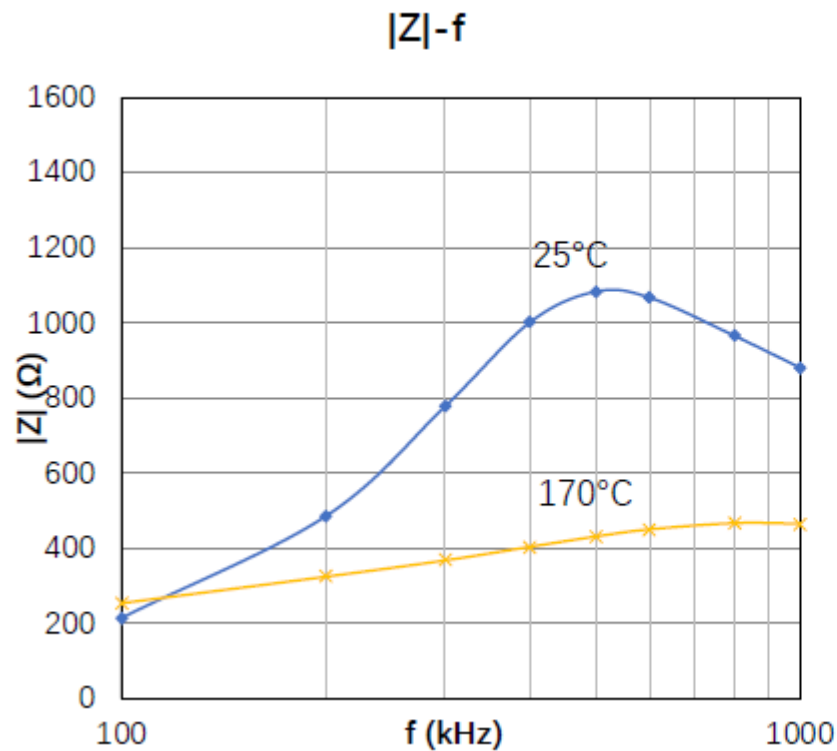
Tc is increase from 125°C to 180°C.



			TL7C	TS7
Initial permeability	$\mu_i$	25C° 10kHz	7000±30%	7500±30%
flux density	Bs(mT)	25C°	480	410
Relative loss factor	$\tan\delta/\mu_i(\times 10^{-6})$	25C°100kHz	< 20	< 20
Relative temperature coefficient	$\alpha_{\mu ir}(\times 10^{-6}/C^{\circ})$	20C°~60C°	-1.0~1.0	-0.5~2.0
Curie temperature	Tc(C°)		≥180	≥125
Electrical resistivity	(Ω•m)		0.15	0.3
Density	d(kg/m³)		4.9×10³	4.8×10³

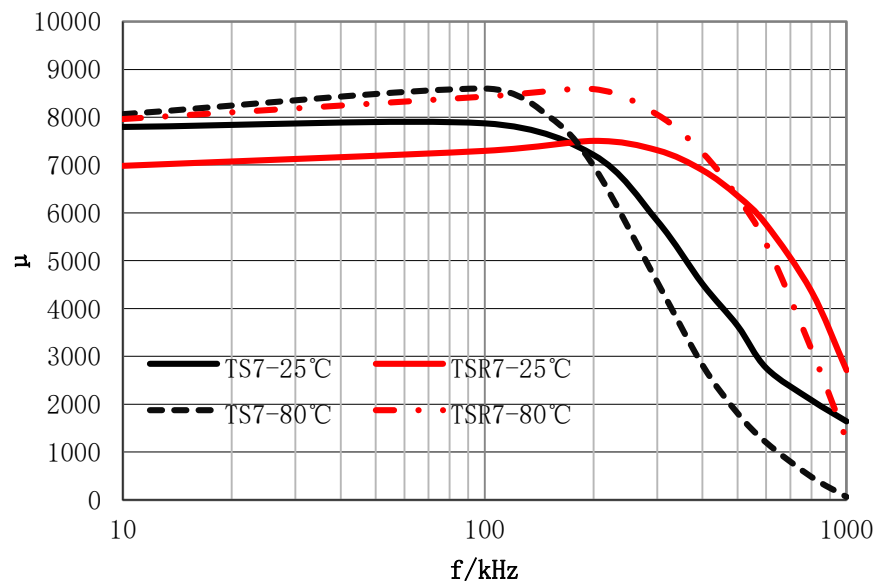
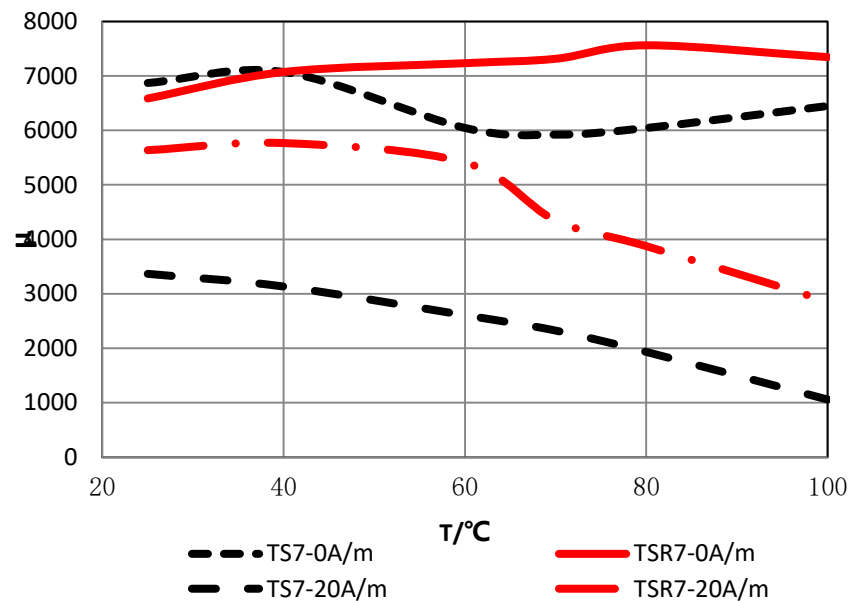
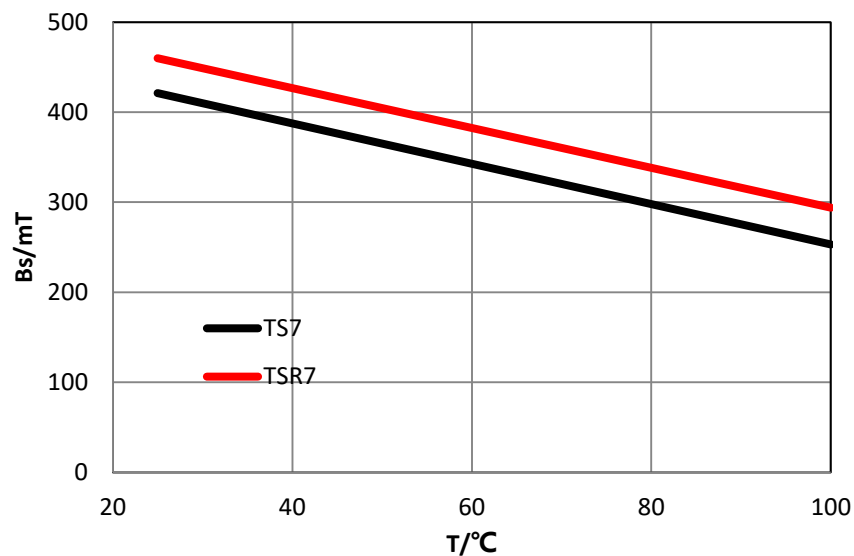
- 保持 $\mu_i=7000$ 不变的情况下，Tc提高到180度以上，目前正在往160度以上开发
- 高Tc导致饱和磁通目的较常规材Bs显著提升，对增加抗叠加特性有利
- 温度特性有一定的恶化

### 3.5.2 7K高Tc材料介绍



- 在170度环境温度下，高Tc的7k材具有较高的阻抗特性和较好的频率特性
- 完全满足汽车特殊部位高温使用的要求。

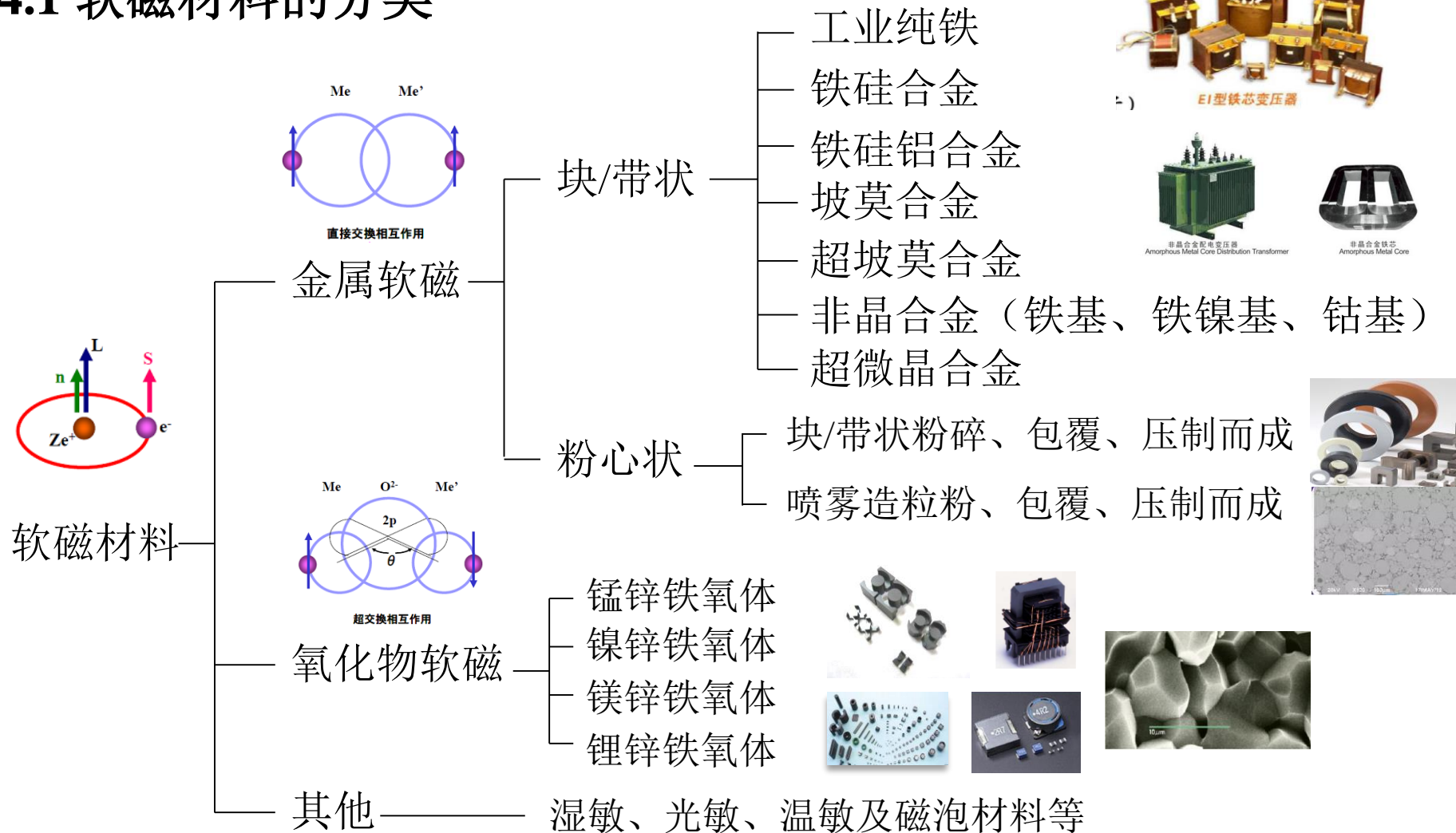
### 3.5.3 7K高叠加材料介绍



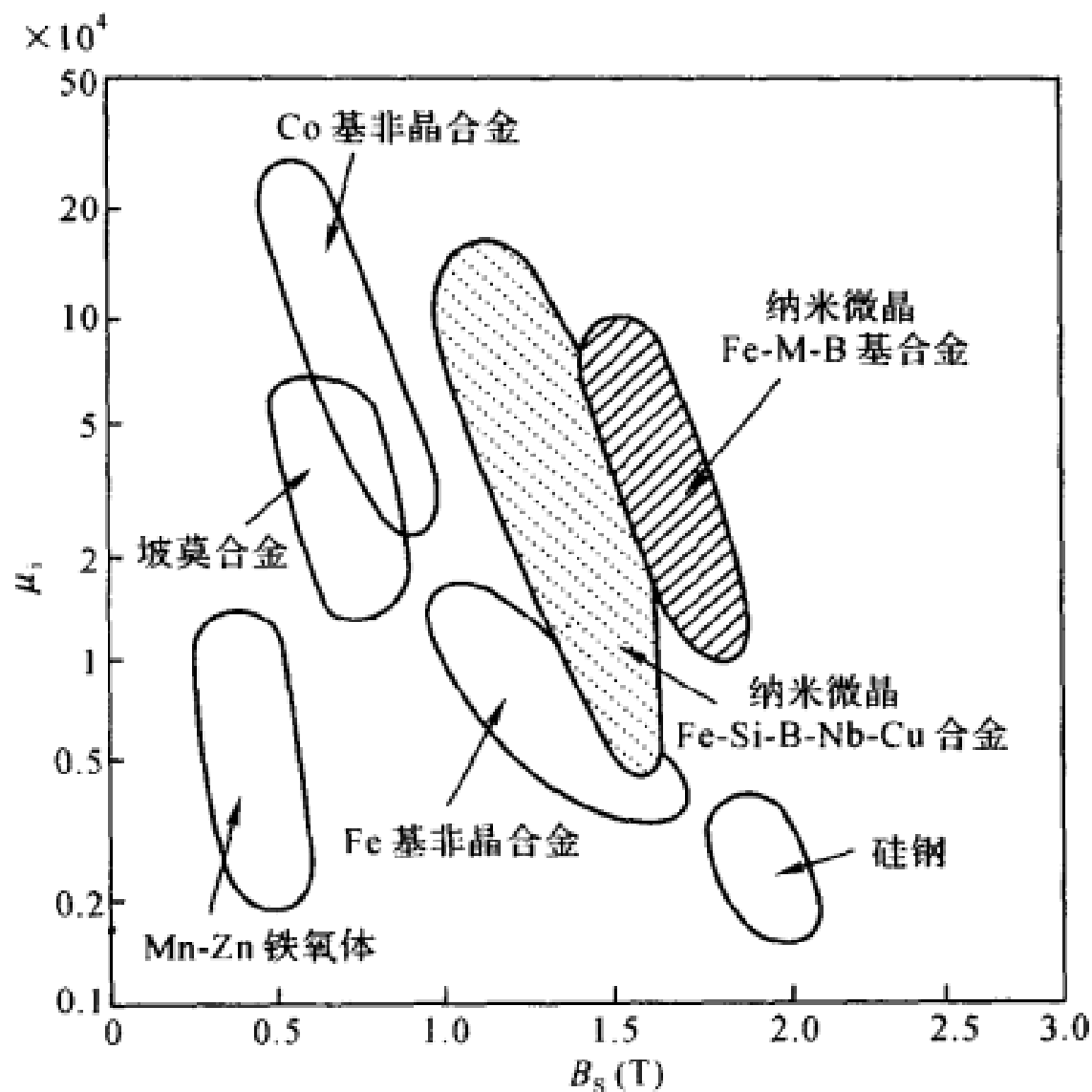
- 应集成差共模电感用的材料需要高饱和磁通密度；
- 同时需要改善材料在使用温度下（高温）的频率特性

# 4.软磁材料发展方向的思考

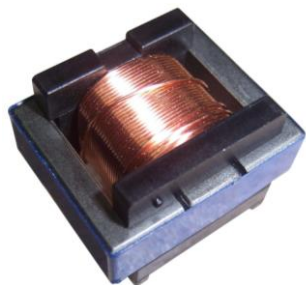
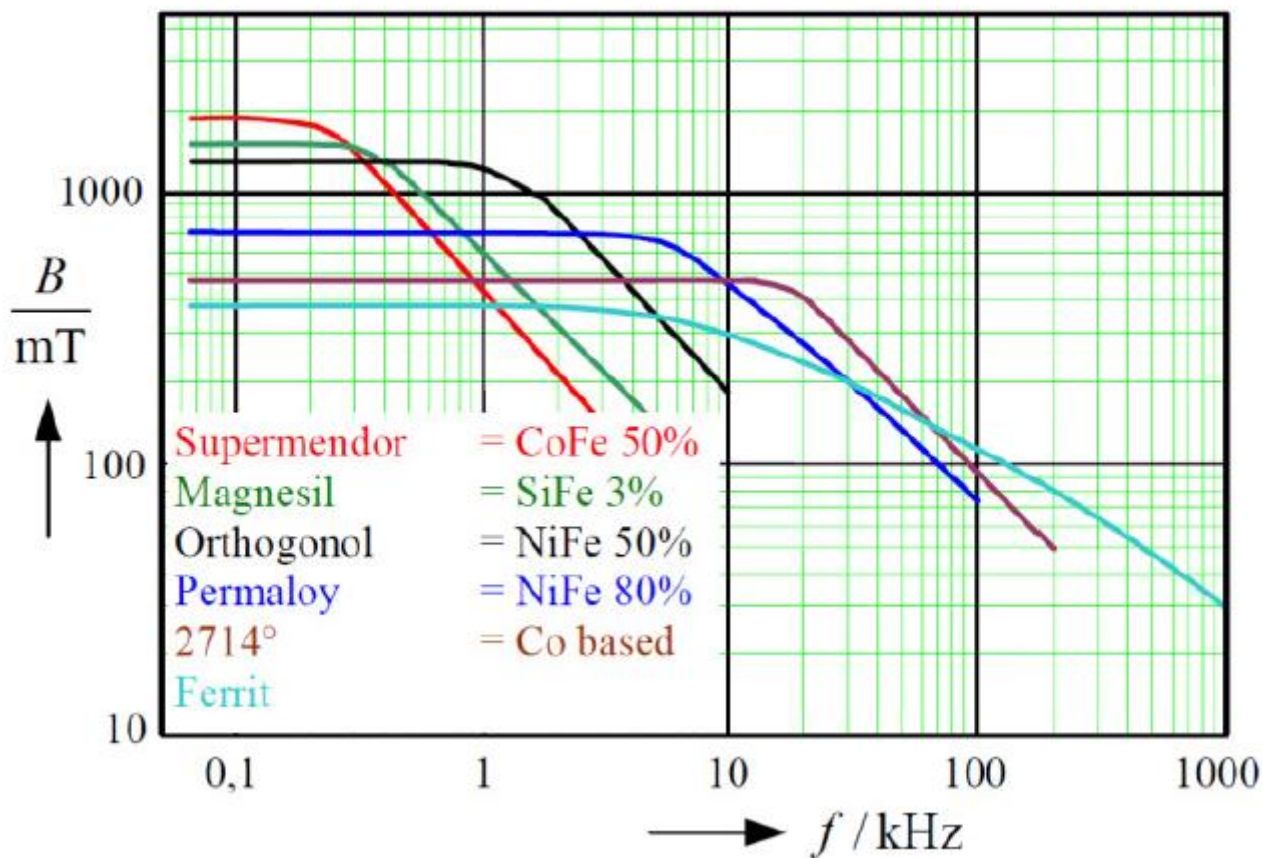
## 4.1 软磁材料的分类



## 4.2 各软磁材料特性比较



## 4.3 磁性元件功率密度提升的难点

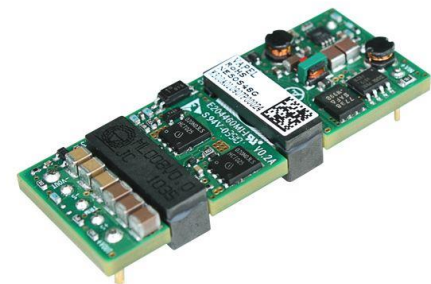
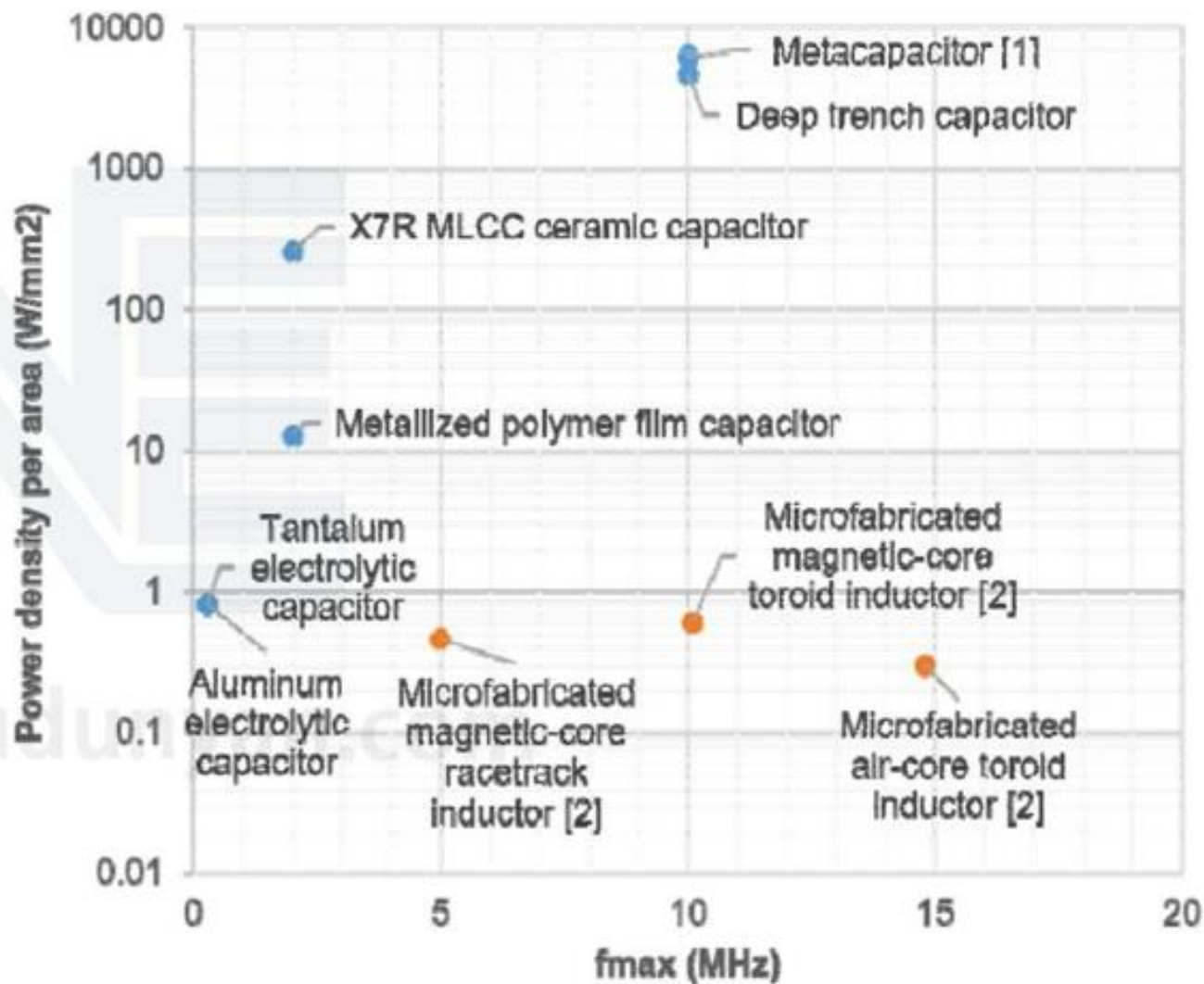


$$A_{Core} A_{Wdg} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{P_t}{k_W J_{rms} \hat{B}_{max} f}$$

- $B$ 是本征特性，金属高于铁氧体
- $B$ 突破性提升难
- 高频是提升磁元件功率密度关键



## 4.3 磁性元件功率密度提升的难点

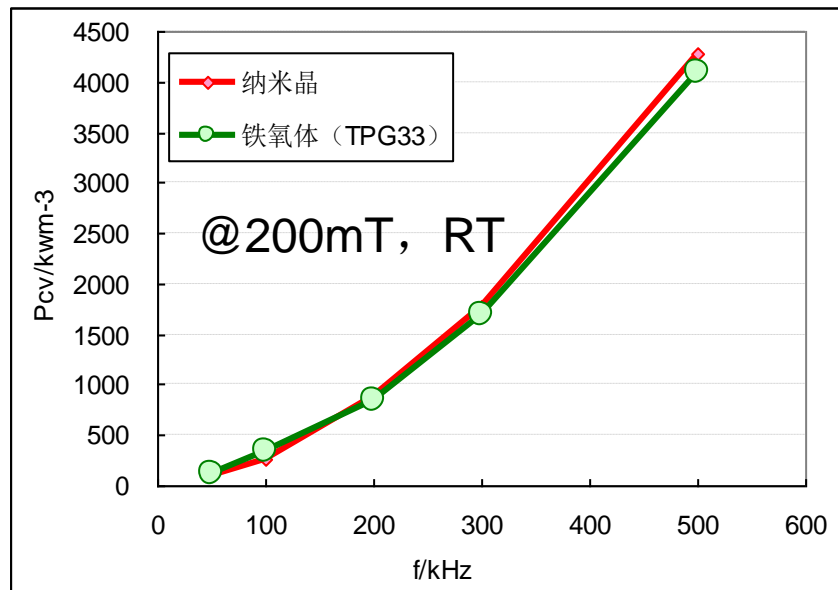
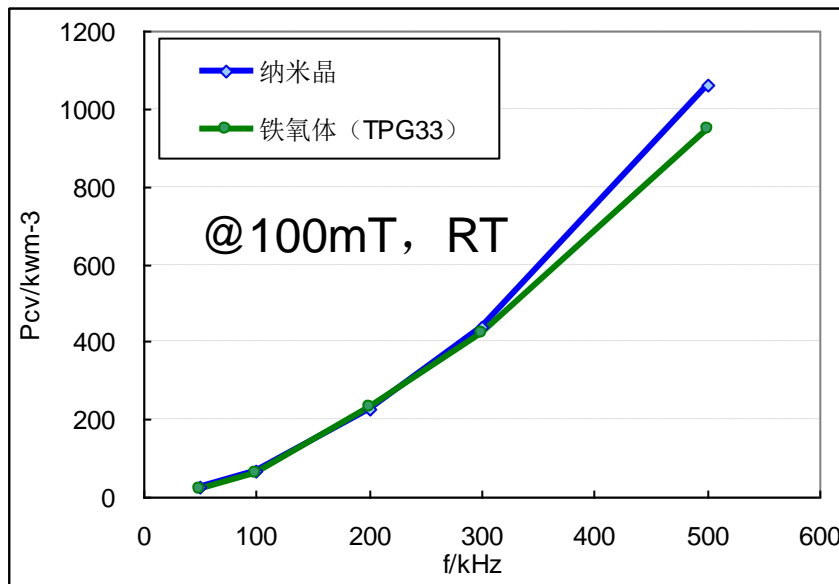


磁元件功率密度低是阻碍开关功率转化器功率密度提升的关键因素

※王瑾，How to Change the Landscape of Power Electronics with Wide Bandgap Power Devices

## 4.3 金属软磁的最近的发展

最新的纳米晶带材损耗和最新的铁氧体材料损耗随频率特性比较：



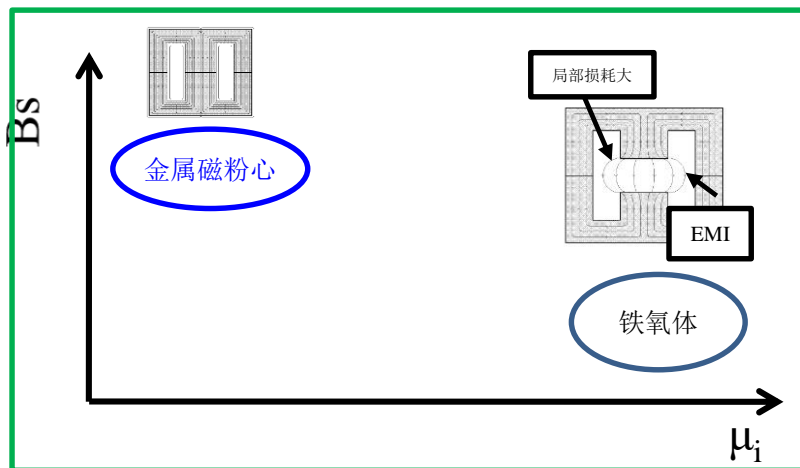
- 300kHz之前，最新纳米晶磁材损耗已经达到甚至超过铁氧体的水平；
- 300~500kHz范围内，纳米晶磁材损耗和铁氧体比较相对较高，但已经相差不大了

→ 纳米晶带材高频化应用取得明显的进步，未来500kHz范围内，会取代铁氧体材料，大幅提升使用的  $\Delta B$  值，提升功率变换器的功率密度？

## 4.3 金属软磁的最近的发展

最新的金属粉心损耗和铁氧体TP4A材料损耗随频率特性比较：

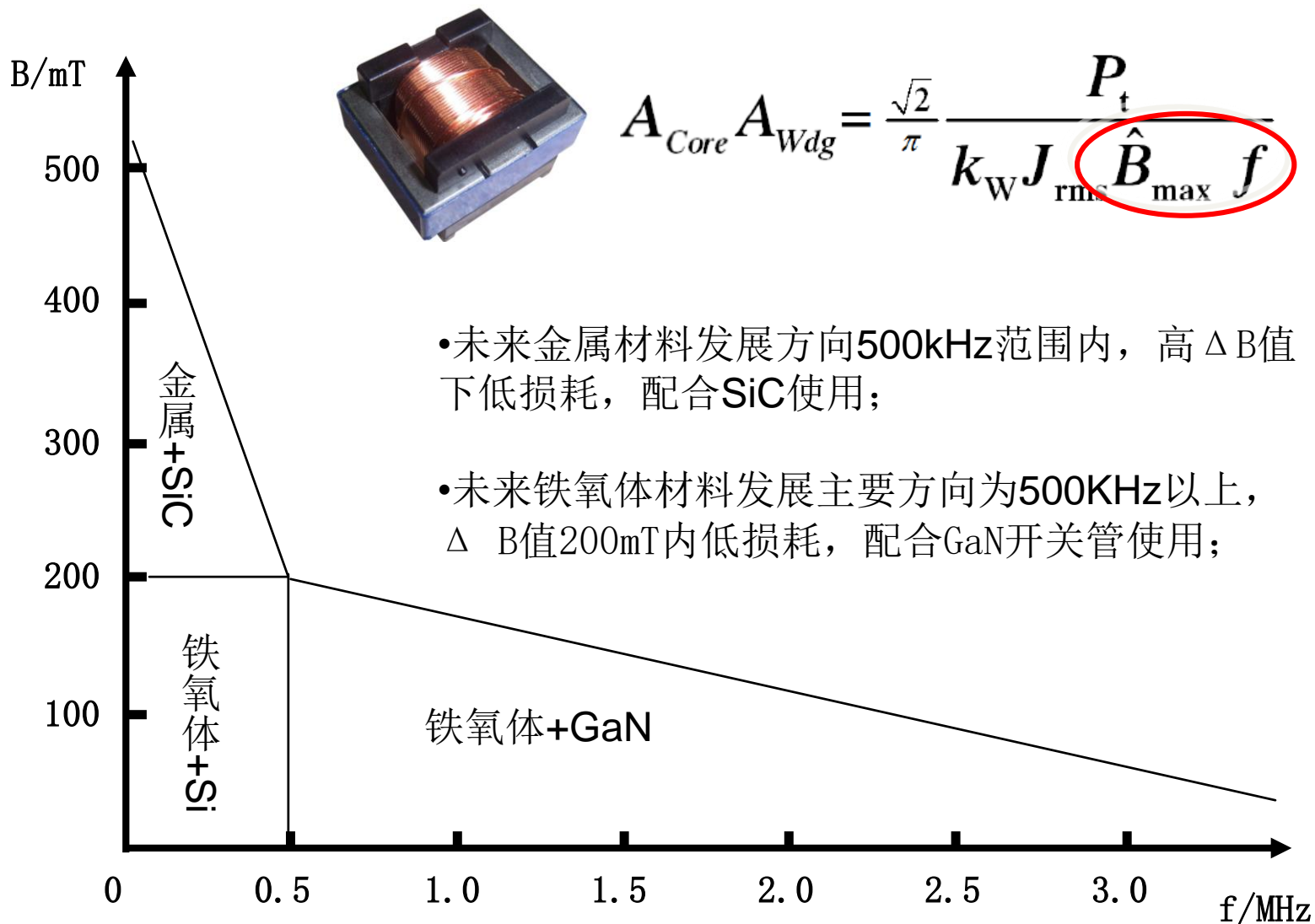
材料	B <sub>m</sub> =50mT					B <sub>m</sub> =100mT	
	50kHz	100kHz	200kHz	300kHz	400kHz	50kHz	100kHz
金属粉心60	57	151	456	849	1373	270	671
金属粉心60（新）	25	59	176	302	509	114	242
金属粉心75（新）	32	82	247	445	729	141	339
TP4A（PC44）	10	24	58	104	172	20	122



•在500kHz范围内金属粉心材料损耗取得了较大进展；

•在100~500kHz范围内，随着金属粉心损耗的进一步降低，可进一步取代铁氧体开气隙材料，减少漏磁对功率变换器EMI的影响，进一步提升功率密度。

## 4.4 未来铁氧体和金属软磁分工预想



1. 磁性材料广泛应用于各行各业，主要作为变压器，电感器在功率变化器中使用，功率变化器发展的永恒主题是高转化效率和高功率密度；
2. 最近几年，新能源汽车，服务器，新的功率半导体材料，集成差共模电感等市场和技术的发展，对磁性材料提出了更高的要求；
3. 对于功率铁氧体而言，宽温低损耗和高频高Bs材料是发展的重点方向。宽温低损耗主要是提升功率转化器的效率，针对特别的应用领域，需要高温的宽温低损耗材料，而高频高Bs主要是对应功率密度的提升；
4. 对EMI用高导铁氧体，高截止频率和高Bs，高Tc是主要的发展方向。高截止频率高Bs材在是集成差共模电感用的要求，而高Tc主要是对应新能源汽车等高温应用领域的需求；
5. 金属材料在高频低损耗方面，取得很大的进展，预测未来500kHz以下应用领域可以使用金属材料提升使用B值来提升功率密度，而500kHz以上应用领域，主要通过铁氧体往高频发展来提升功率密度。未来两者分工会更加明朗。

谢谢大家