

高带宽微小动态电流的测量

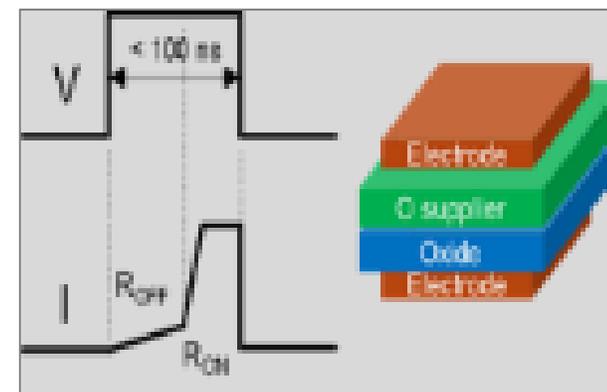
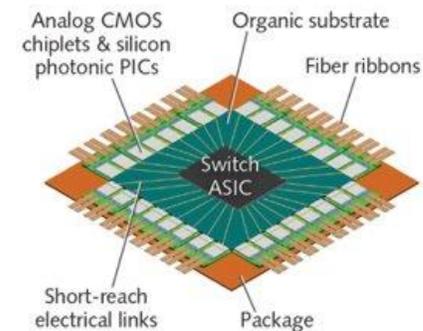
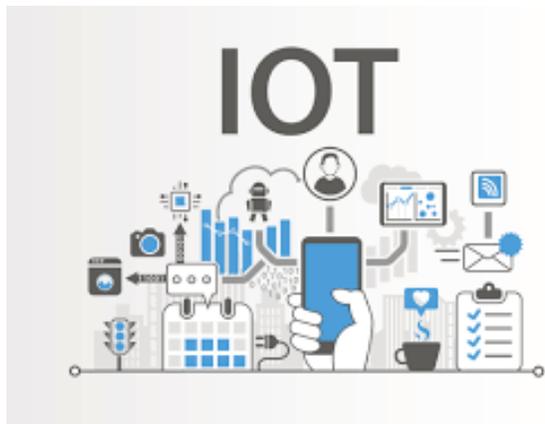
吕宝华， 饶骞

电源和通用产品市场经理



智能设备、新器件和新材料的高速发展

高精度的动态电流测量迫在眉睫



动态小电流测量应用一

低功耗分析和续航



产品的功耗 (电流: xx A)



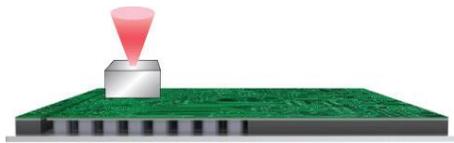
$$\text{续航时间}n = \frac{yy \text{ Ah}}{xx \text{ A}}$$



电池容量: yy Ah

动态小电流测量应用二

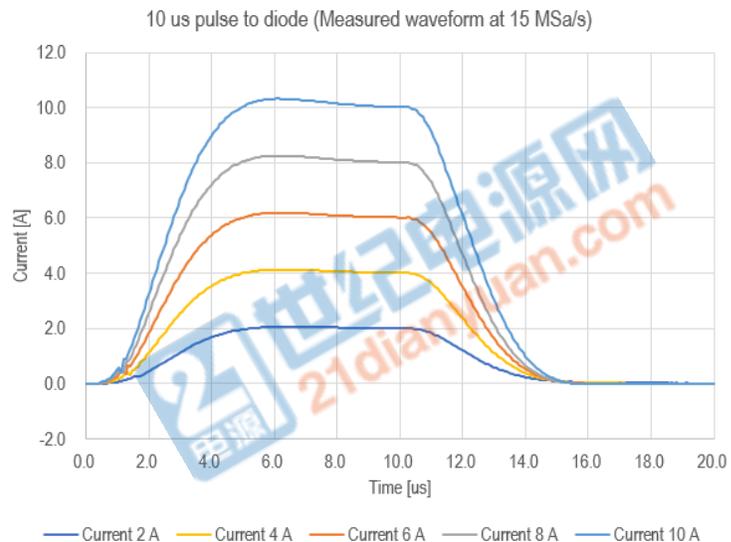
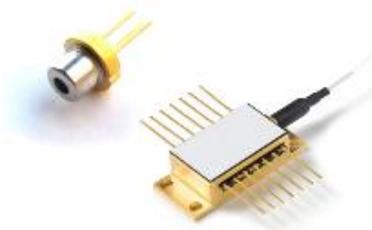
器件特性的表征



VSCEL



LIDAR



DUT: diode (MUR105G), which is used in the demo kit



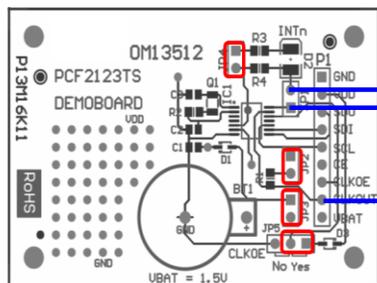
M9602A / M9603A 源表PXI模块

- ✓ 电压范围: 60V
- ✓ 电流范围: 10.5A (脉冲)
- ✓ 电流分辨率: 100fA
- ✓ 最小脉冲宽度: 10uS
- ✓ 采样速率: 15MSa/s

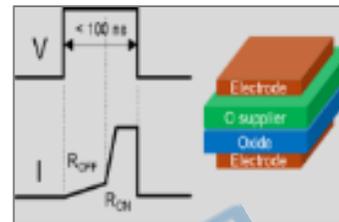


动态小电流测量应用三

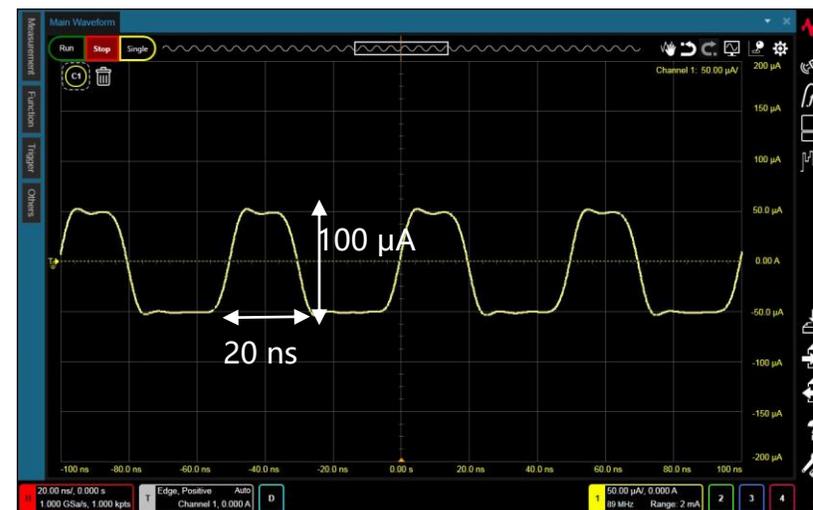
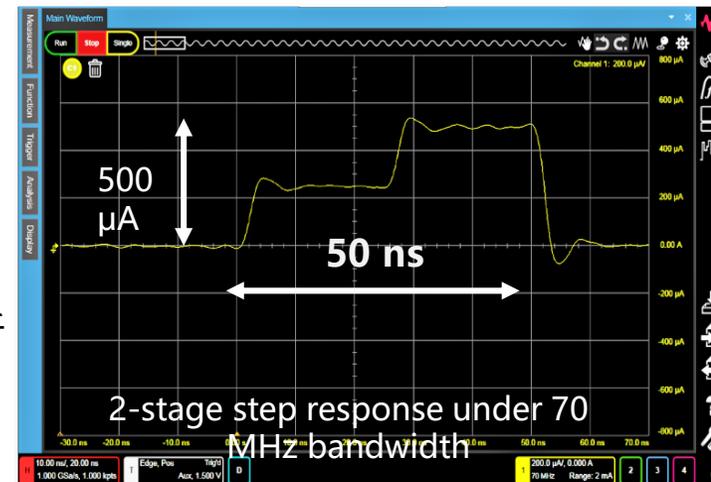
器件和材料电流特性的分析



RTC时钟电路的测试数据：
 频率：32.7705KHz
 平均电流：
 134.015nA

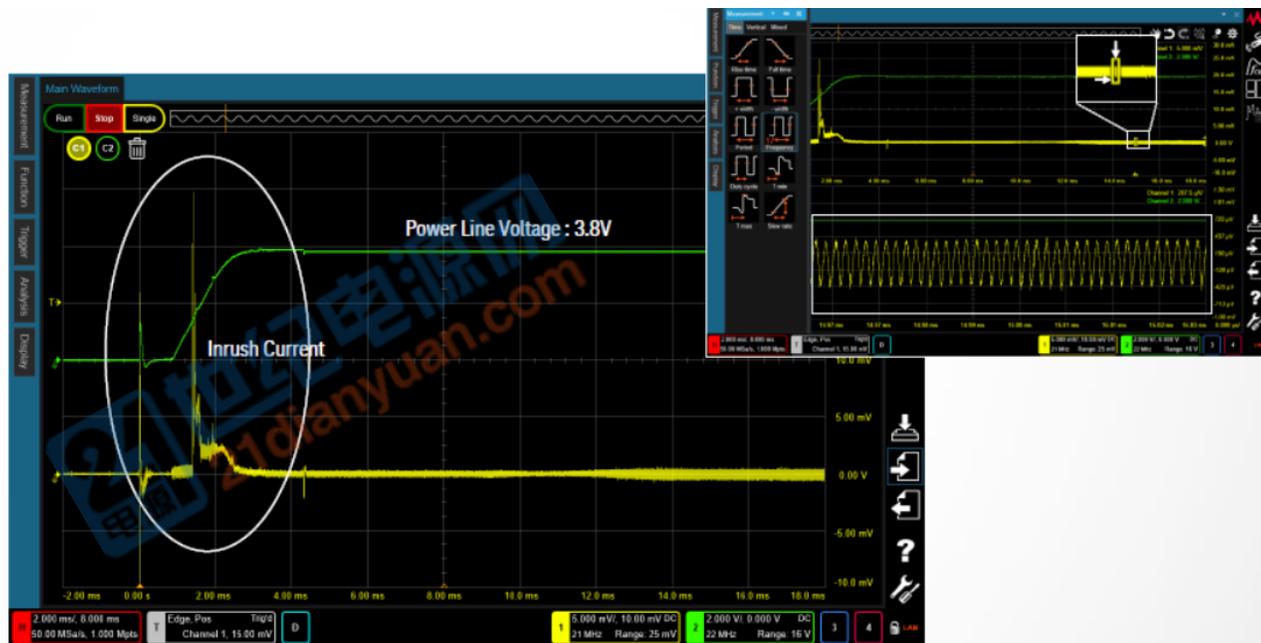
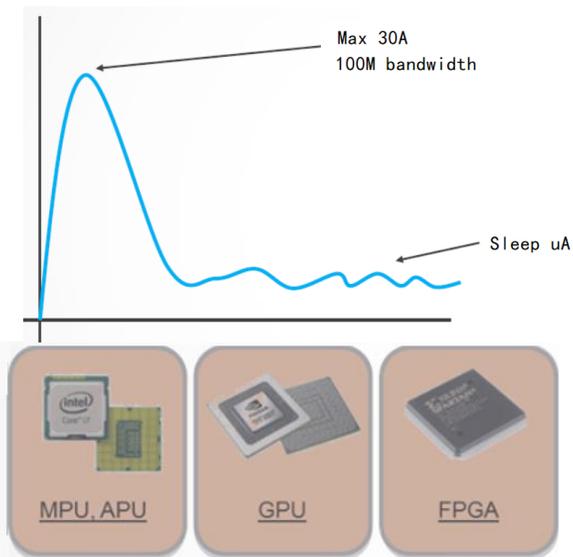


NVM 电流特性分析



动态小电流测量应用四

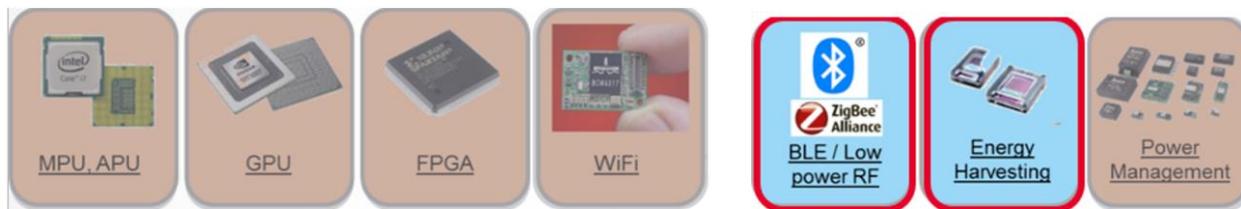
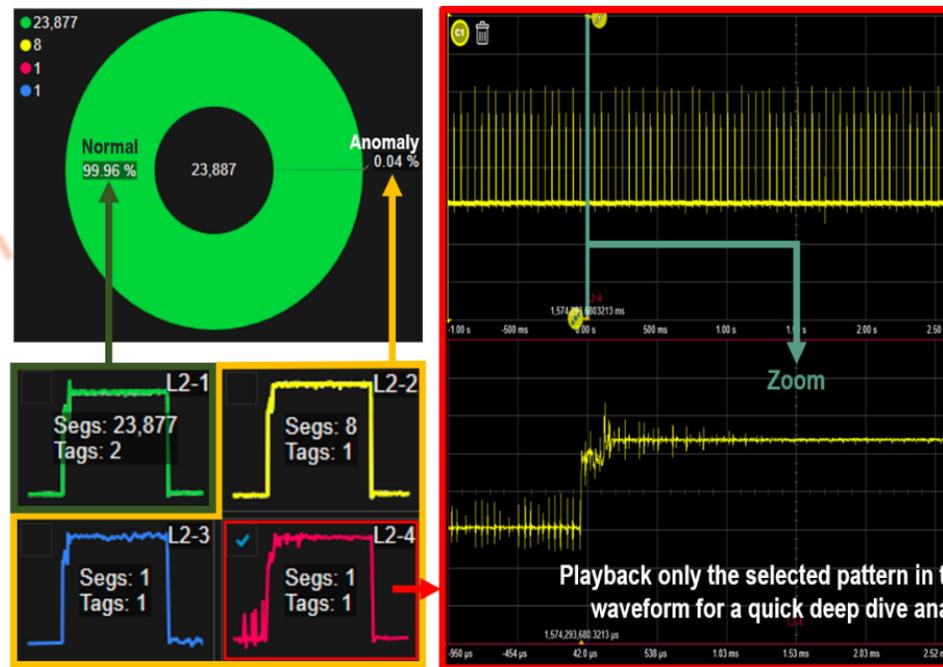
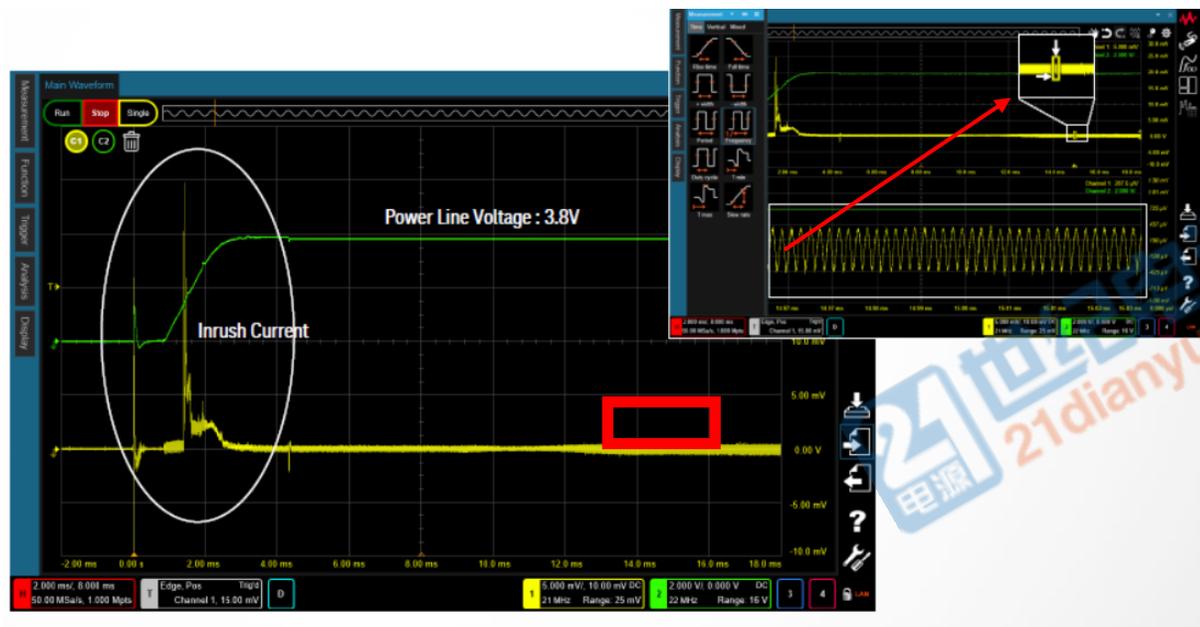
XPU处理器芯片的大动态电流测量



处理器电流特征：
带宽高、动态大、低噪声
测试要求，测量瞬间大电流时，同时测量小信号。

工程师需要的电流进行测量五

可靠性测试和分析

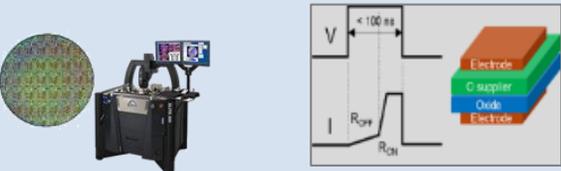


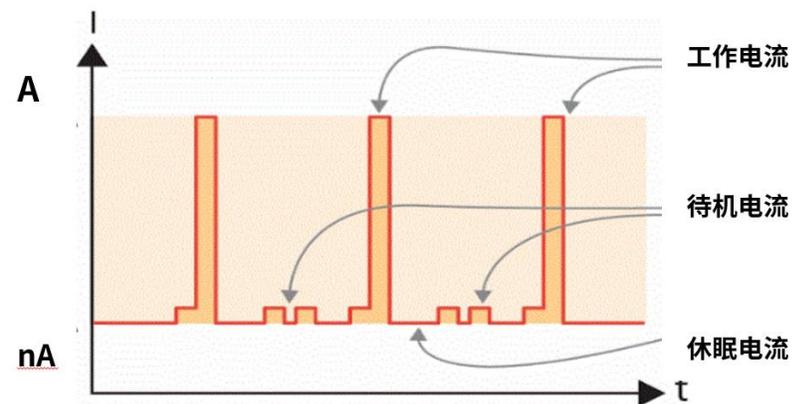
MCU偶发干扰信号查找
捕获30分钟内约23000个波形中，仅仅出现1次（概率0.04%）的异常波形

电流测量面临的挑战

高带宽、高动态、长时间、传感器对电路的影响

新材料、半导体器件、芯片、无线模块、物联网、医疗、新能源
高精度电流测量、高动态、高带宽的电流测量都极具挑战

半导体器件	处理器/芯片	物联网、穿戴、医疗、汽车等
 <p>NV memory, GaN, SiC, MOS</p>	 <p>SoC, xPU, MCU, FPGA, DSP, ASIC</p>	



Agenda

- 基于直流电源分析仪和源表的动态电流和功耗分析
- 更高带宽的动态小电流测量
- 演示



AI/VR/IoT电流特征精确测量的挑战

高电流动态范围

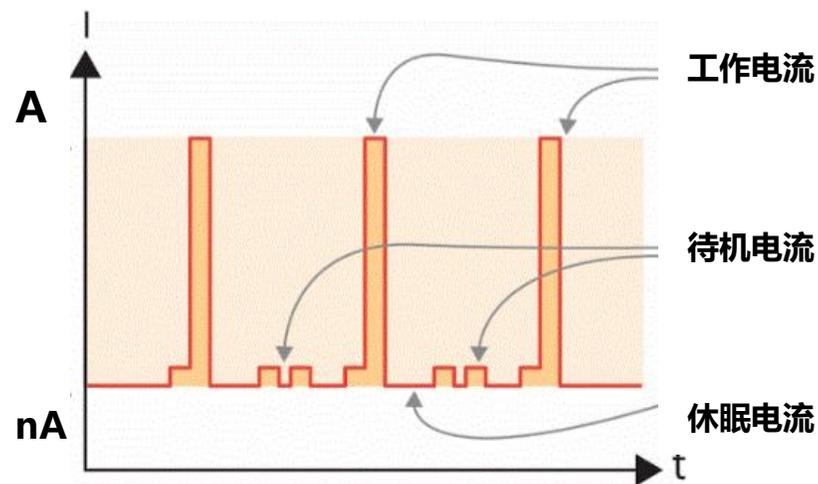
1. 休眠电流小，uA，甚至nA以下(底噪)
2. 工作电流大，数十mA甚至A，需要极高的动态电流测量能力 (A/D垂直分辨率)



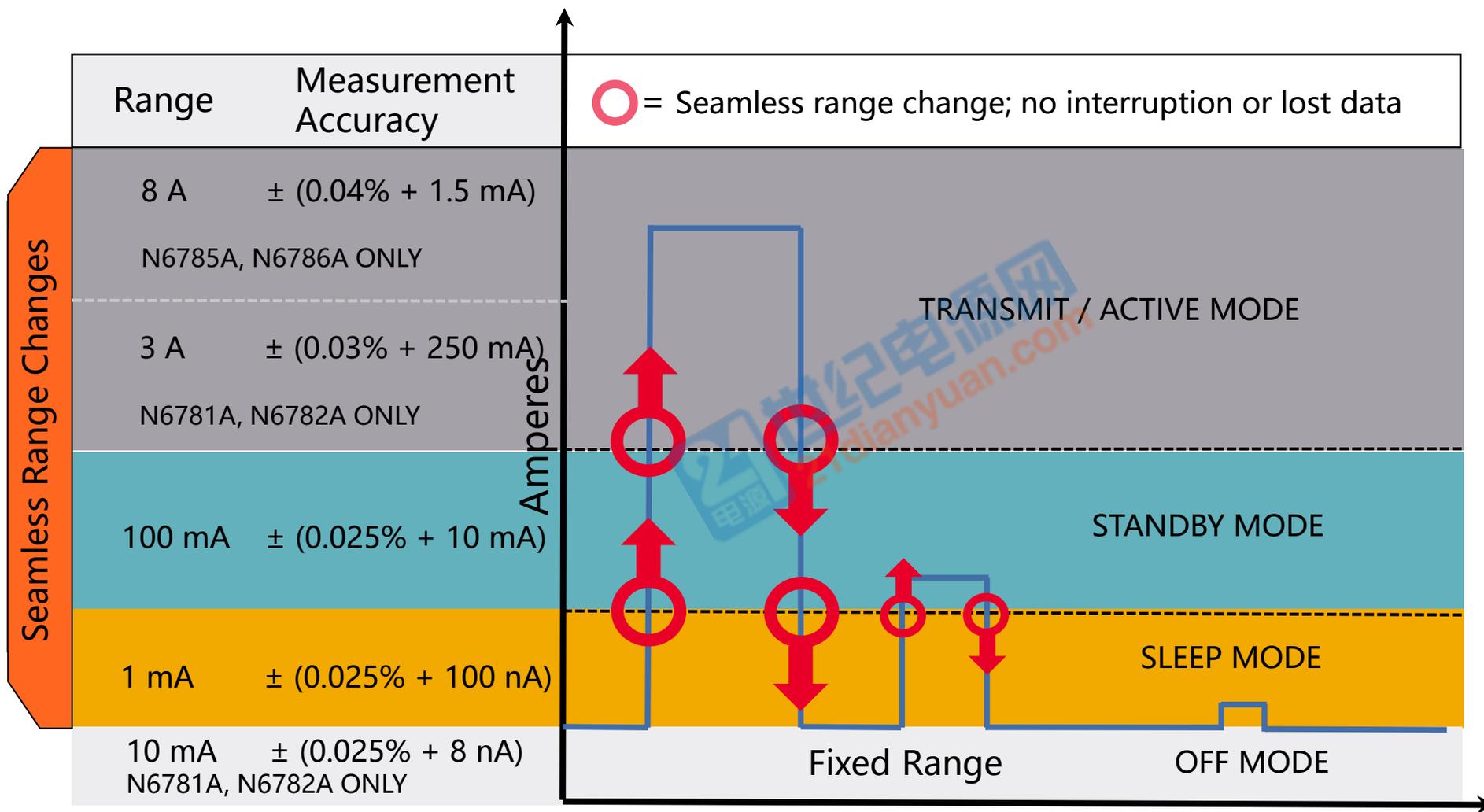
NB-IoT 模块，PSM模式耗电2.868uA，工作时最大电流为206.75mA，相差10万倍。

长时间的记录

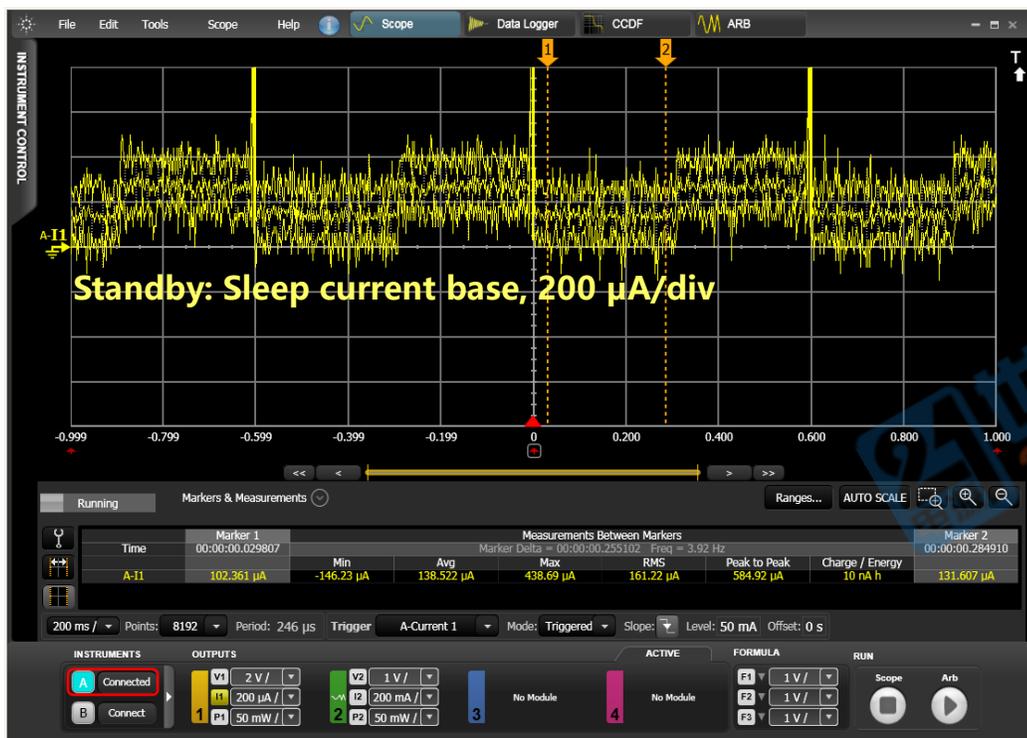
1. 窄电流脉冲测量，采样速度快 (采样率)
2. 应用场景持续测量，采样时间要长
存储深度 = 采样率 X 时间



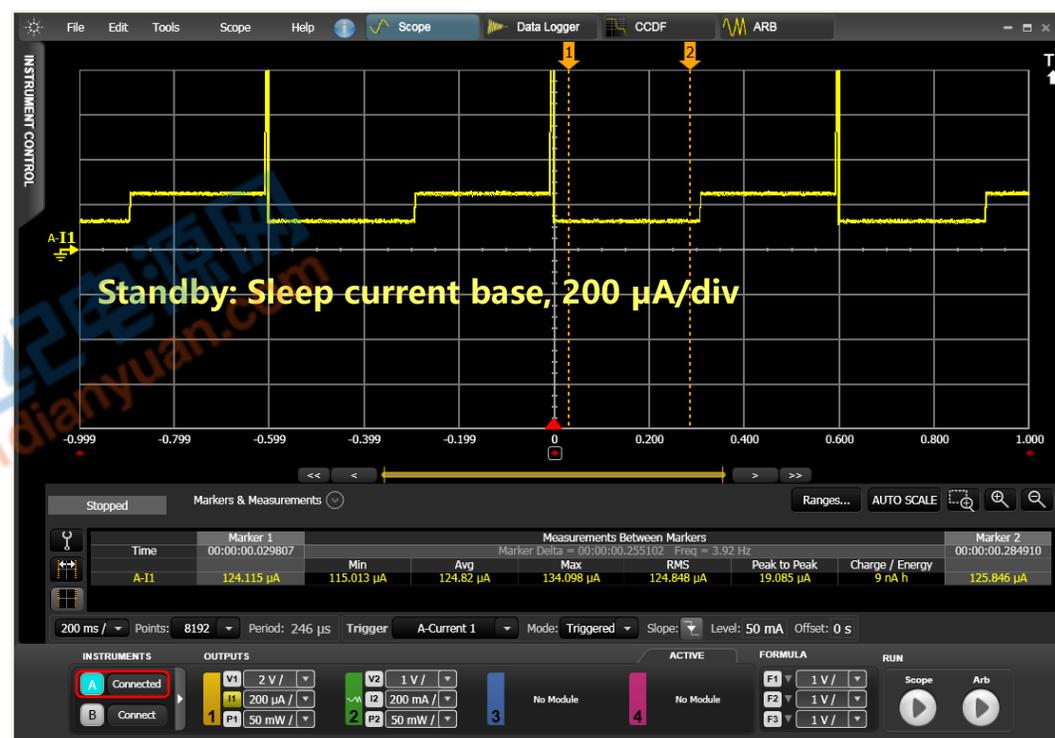
无缝量程切换拓展电流测量动态 (Seamless Ranging)



无缝量程动态电流测量效果

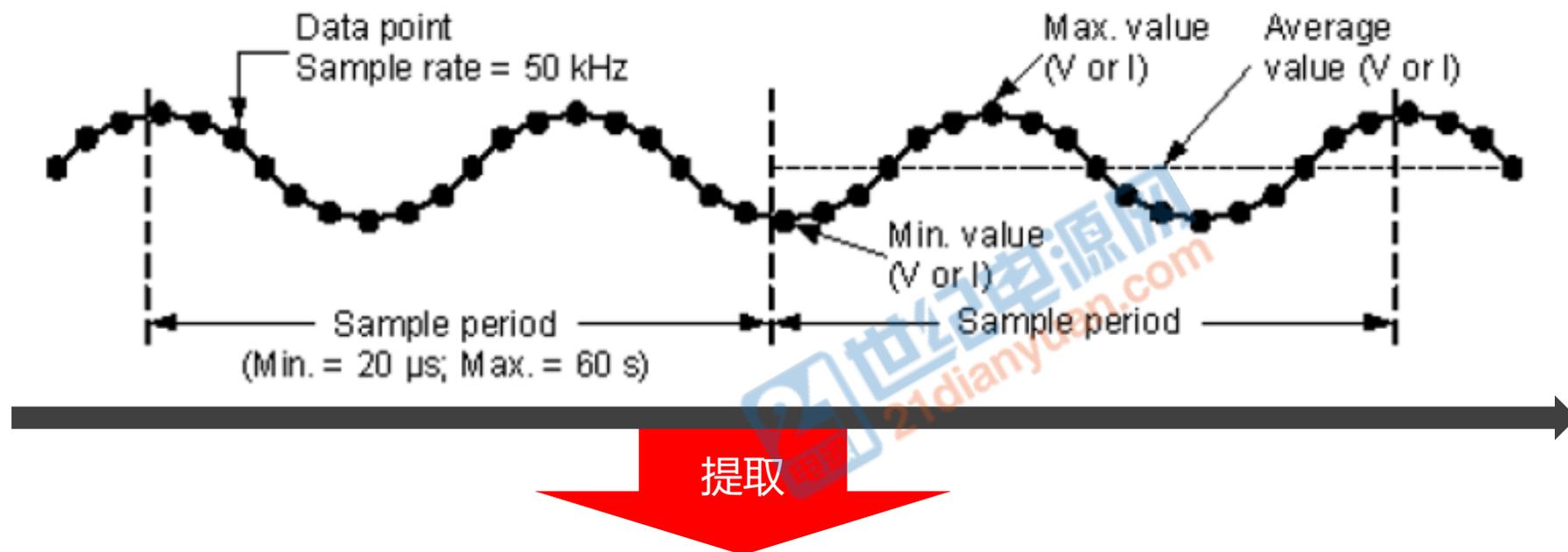


Fixed Range Measurement

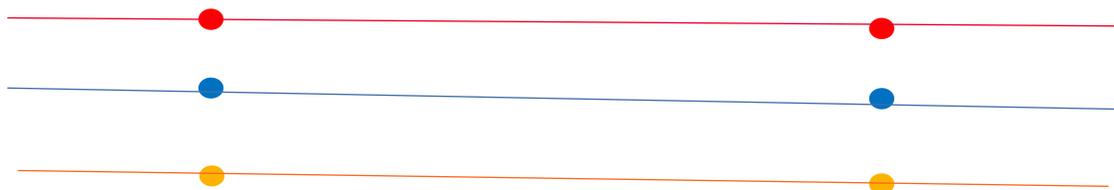


Seamless Ranging Measurement

APS独特的数据记录仪 (Data Logger)



平均值, 最大值、最小值 (可选)

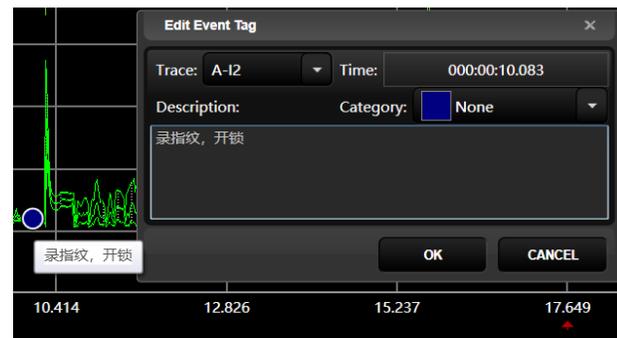
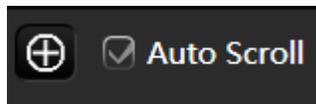


- ✓ 高达200KHz (5us)采样率
- ✓ 长达 1000小时连续数据记录

“智能门锁” 功耗实测/分析过程



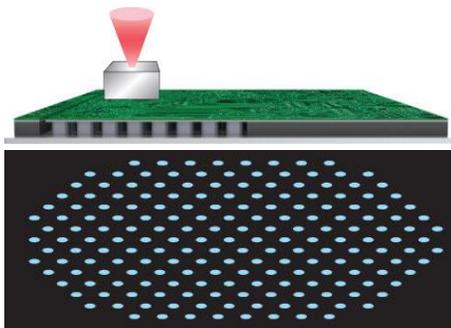
- ✓ BV9200启动数据记录仪 Data Logger
- ✓ “门锁”的锁盖开启 -> 指纹识别 -> 开锁 -> 锁盖闭合
- ✓ 软件可在操作处设定“事件标签”



高功率激光器件脉冲I-V 特性测试

激励和测量同时进行

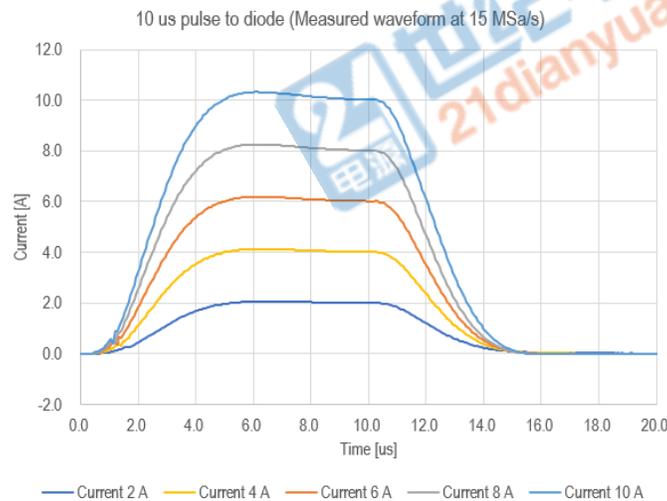
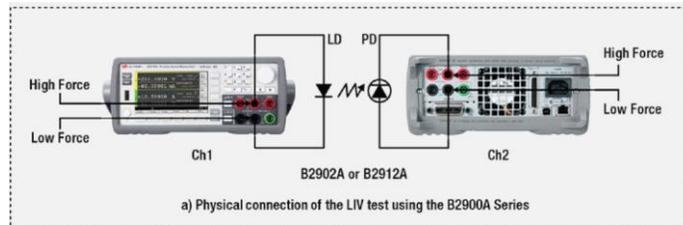
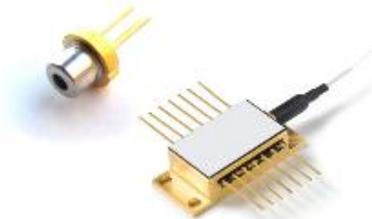
光电芯片和模块



VSCEL



LIDAR



DUT: diode (MUR105G), which is used in the demo kit

PZ2120/21A 窄脉冲PXI SMU

- ✓ 电压范围：60V
- ✓ 电流范围：10.5A (脉冲)
- ✓ 电流分辨率：100fA
- ✓ 最小脉冲宽度：10uS
- ✓ 采样速率：15MSa/s

PZ2100 高密度模块化源表

新



PZ2100A 1U 高度主机箱
可以插入四个SUM模块



源表模块



PZ2110A High-Resolution SMU



PZ2120/21A High-Speed SMUs



PZ2130/31A 5-ch High-Density SMUs



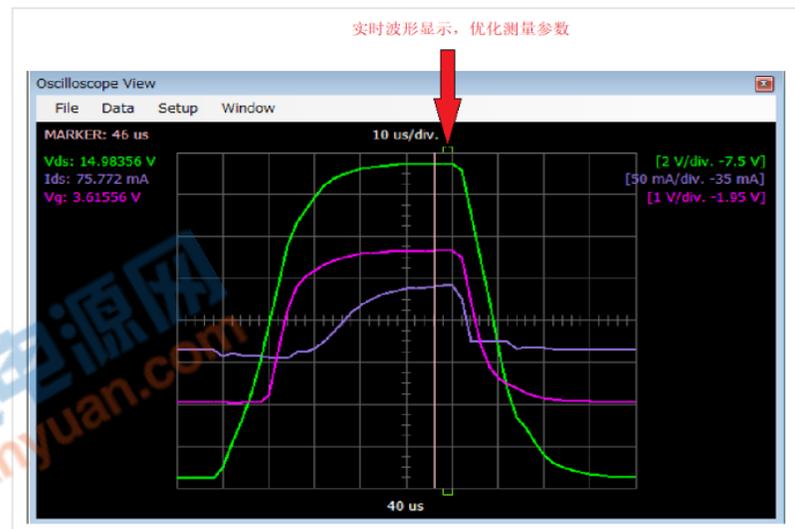
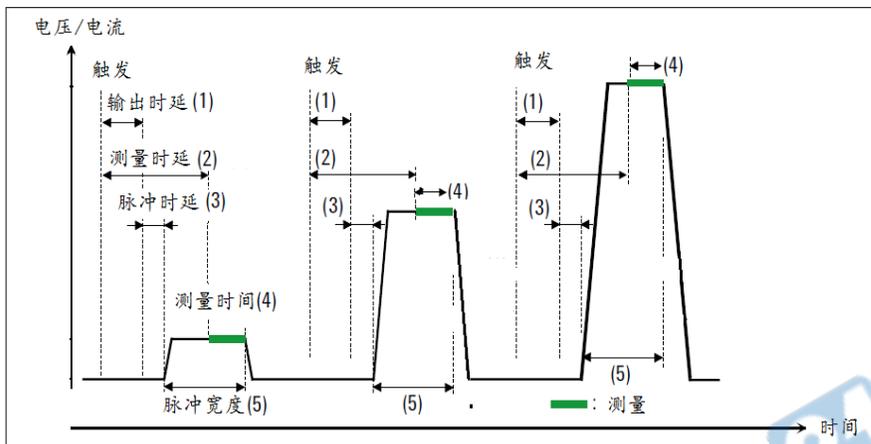
PW9251A PathWave IV Curve Software

PZ2100 系列SMU主机和模块

TYPE	MODEL	FEATURES / SPECS
PZ2100 主机		1U – 4个模块， 最多同时控制20路输出
PZ2110A 高分辨率模块		单路SMU 模块, 1.25 MSa/s, 10 fA, 210 V, 315 mA DC/pulse 10 fA 分辨率, 20 μs 窄脉冲, 快速电压变化 1.4 V/μs 变化摆率
高速模块		PZ2120A 精密源表模块, 1 MSa/s, 100 fA, 60 V, 3.5 A DC/10.5 A pulse 50 μs p窄脉冲. 宽输出范围 60V/3.5 A DC/10.5 A。无缝量程
		PZ2121A 精密SMU模块 15 MSa/s, 100 fA, 60 V, 3.5 A DC/10.5 A pulse 提供最佳的窄脉冲性能: 10 μs 脉冲宽度. 宽范围输出, 无缝量程
高密度模块		PZ2130 5通道低成本精密SUM模块, 100 pA, 30 V, 500 mA DC
		PZ2131 5 通道模块 500 kSa/s, 10 pA, 30 V, 500 mA DC/pulse, 100 μs 窄脉冲

多路电压和电流的同步脉冲测量

精确的测量延时设置，确保可靠性和充分性



Measure Speed : MANUAL (500 μ s (0.025 PLC)

Digitizer Mode : Off

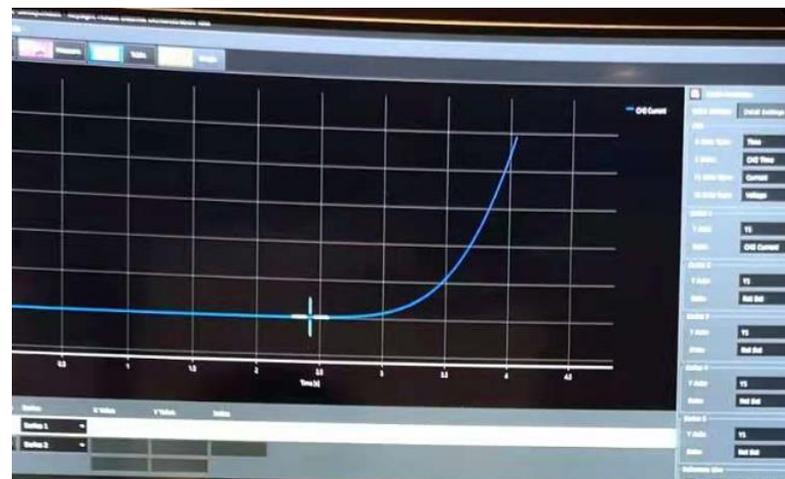
Sweep Parameters

Ranging Parameters

Pulse

Trigger

	Source	Measure
Count :	1	1
Delay :	0 s	100 μ s
Period :	1 ms	1 ms
Trigger :	TIMER	TIMER



Agenda

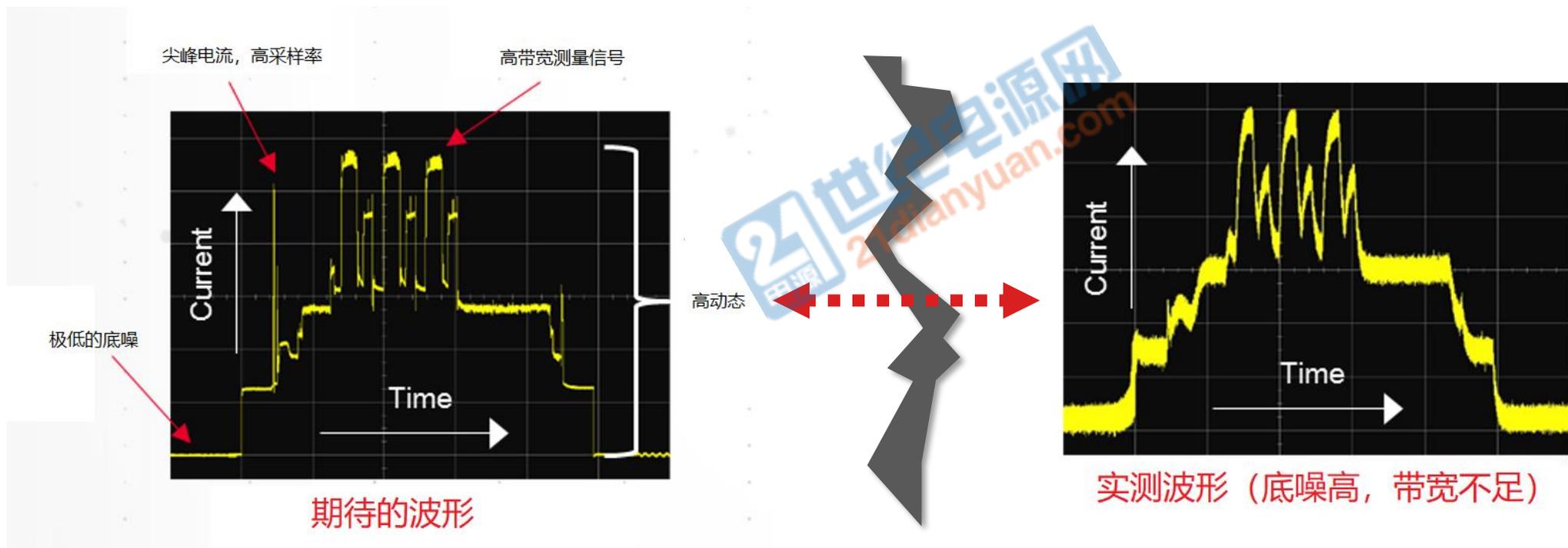
- 基于直流电源分析仪和源表的动态电流和功耗分析
- 更高带宽的动态小电流测量
- 演示



高带宽、高动态电流信号测量面临的难题

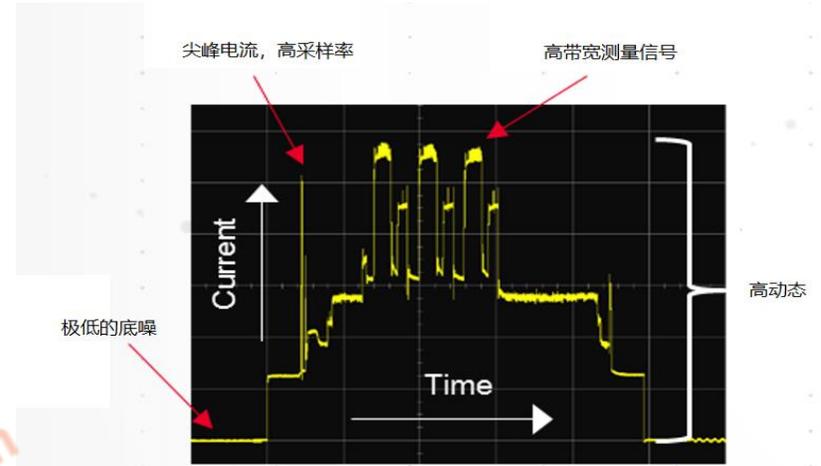
系统带宽、分辨率、系统底噪

示波器是工程师的眼睛，但同意会“看走眼”

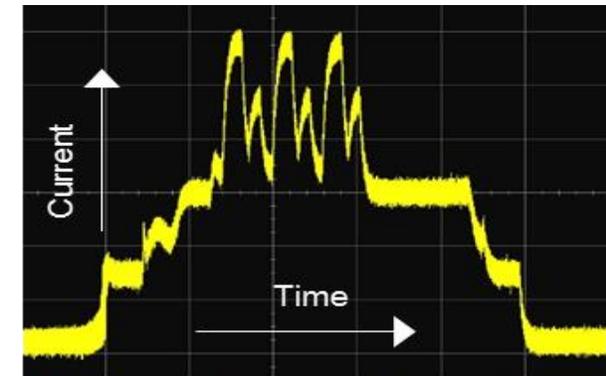


示波器测量小动态电流存在的问题

优点	问题
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 示波器平台的测量带宽高，电流探头种类多，选择范围大 ✓ 通道数量多，电压和电流，甚至数字信号同步测量 ✓ 多种可选择的探头 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ 受限于示波器的AD位数限制，电流测量精度较低； ❖ 受限于本底噪声和电流探头的限制，很难完成小电流测量 ❖ 互感式电流每次测试前，都需要进行消磁，归零等额外操作，以消除探头的误差



期待的波形



Measured waveform (noisy, insufficient bandwidth, ...)



物联网 / 芯片

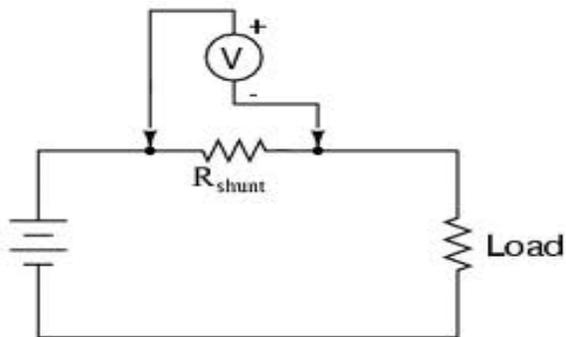


医疗 / 无线模块



电流探头

欧姆定律 $I = U/R$

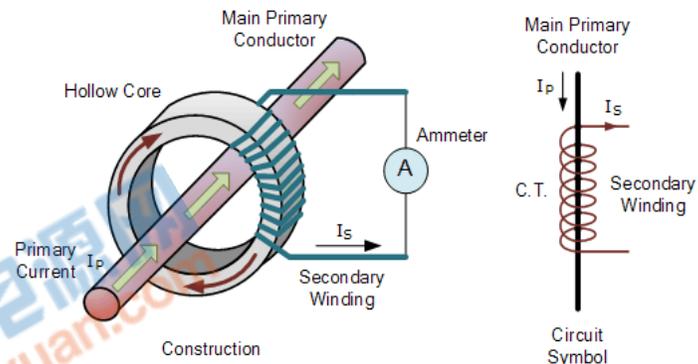


取样电阻“Rshunt”串联到回路，通过测试其端电压U，依据欧姆定律获得电流： $I = U / R$



- 测量简单，直流测量精度可以达到比较高的程度
- 小电流测量需要较高的阻值，可能会影响电路的正常工作。

磁效应



依据电流的磁效应，将待测大电流转换为测试仪表可量测的小电流I_s或电压U_s

CTA60 60A/DC ~800kHz
CTA200 200A/DC ~500kHz
CTA700 700A/DC ~100kHz
CTA1000 1000A/DC ~500kHz



互感器



1146B 100-kHz current probe

霍尔感应



N7040A 23 MHz, 3,000 Apk Rogowski coil AC current probe

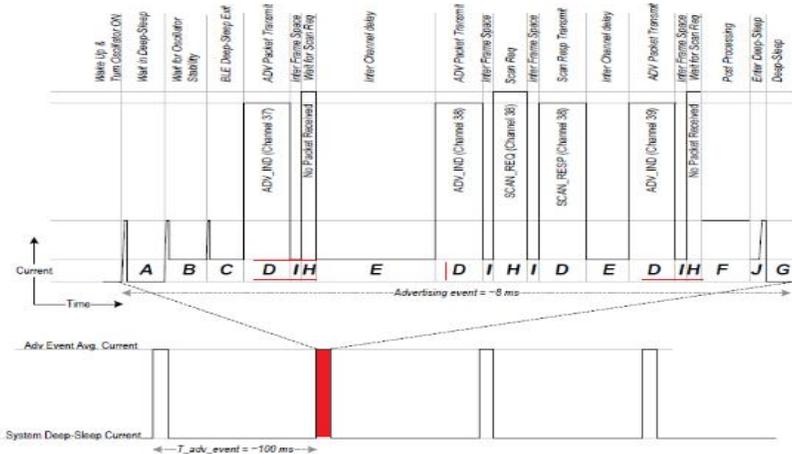
罗氏线圈

难以精确分析小于mA 级的电流

高动态小电流测量

CX3300 器件电流波形分析仪

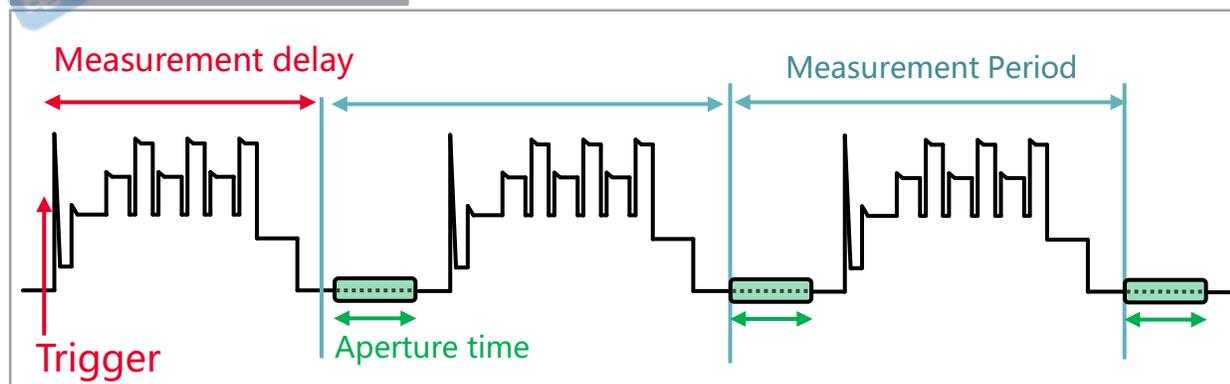
IoT、AI芯片



- ✓ 1GSa/s 采样，高达 21*比特电流分辨率
- ✓ 低至400nV电压噪声
- ✓ 低至150pA电流噪声
- ✓ mA电流高达200MHz



Request

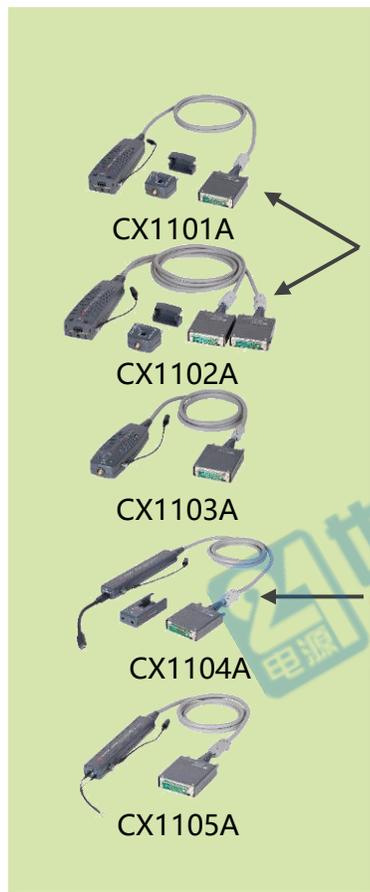


CX3300 构成及配置



主机

+



电流及差分电压探头



前端适配器
(CX1201A to CX1206A)

+



前端适配器
(CX1211A to CX1216A)



=



CX1100 电流探头系列

Sensor	Image in new color	Features	Key applications
CX1101A Single Channel Current Sensor		<ul style="list-style-type: none"> • 40 nA to 1 A (10 A) • 100 MHz • +/-40 V 	<ul style="list-style-type: none"> • General purpose • IoT, Wearable, Medical • Sensor • Semiconductor
CX1102A Dual Channel Current Sensor		<ul style="list-style-type: none"> • 40 nA to 1 A • 100 MHz • +/-12 V 	<ul style="list-style-type: none"> • IoT, Wearable, Medical
CX1103A Low Side 100 pA Current Sensor		<ul style="list-style-type: none"> • 150 pA to 20 mA • 200 MHz • +/-0.5 V 	<ul style="list-style-type: none"> • On wafer semiconductor device • NVM (ReRAM, PRAM, MRAM) • Display devices (OLED)
CX1104A Selectable Shunt Current Sensor		<ul style="list-style-type: none"> • 1 μA to 15 A • 20 MHz • +/-40 V 	<ul style="list-style-type: none"> • General purpose • WiFi • Actuator, Sensor,
CX1105A Ultra-Low Noise Differential Sensor		<ul style="list-style-type: none"> • 1 μA to 100 A • 100 MHz • +/-40 V / 6 V 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobile device, SoC, FPGA, APU, MPU, • ECU • Semiconductor

CX1101A-03A小电流探头



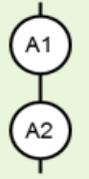
CX1101A 通用型探头



- ✓ 占用CX3300一个通道
- ✓ 最大带宽: 100 MHz
- ✓ 测量范围: 40nA to 10A
- ✓ 浮地电压: +/- 40V
- ✓ 配合转接头使用



CX1102A 双量程探头



- ✓ 占用CX3300 两个通道
- ✓ 最大带宽: 100 MHz
- ✓ 量程范围: 40nA to 1A
- ✓ 浮地电压: +/-12V
- ✓ 支持更大的电流动态
- ✓ 配合转接头使用

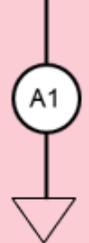
更高动态电流测量 (100dB)

表 6. CX1101A 电流传感器, 单通道, ± 40 V, 100 MHz, 40 nA 至 1 A

通道	范围	噪声有效值 ¹	最大带宽 (-3 dB)	输入电阻 (典型值)
	10 A	10 mA	3 MHz ²	15 mΩ
	1 A	2 mA		
	200 mA	0.2 mA		
	20 mA	20 μA	100 MHz	410 mΩ
	2 mA	3 μA		
	200 μA	500 nA ⁵	500 kHz ⁵	
		400 nA ³	25 kHz ³	
	20 μA	150 nA ⁵	500 kHz ⁵	50 Ω
		40 nA ³	25 kHz ³	



CX1103A 小电流探头

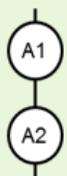


- ✓ 占用CX3300一个通道
- ✓ 最大带宽: 200 MHz
- ✓ 测量范围: 150pA至20mA
- ✓ 浮地电压: +/- 0.5V
- ✓ 固定的 SMA端子

低噪声 (nA)
&
高带宽 (200MHz)

CX1102A 扩展动态电流测量

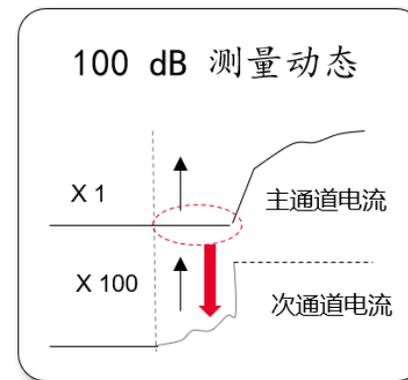
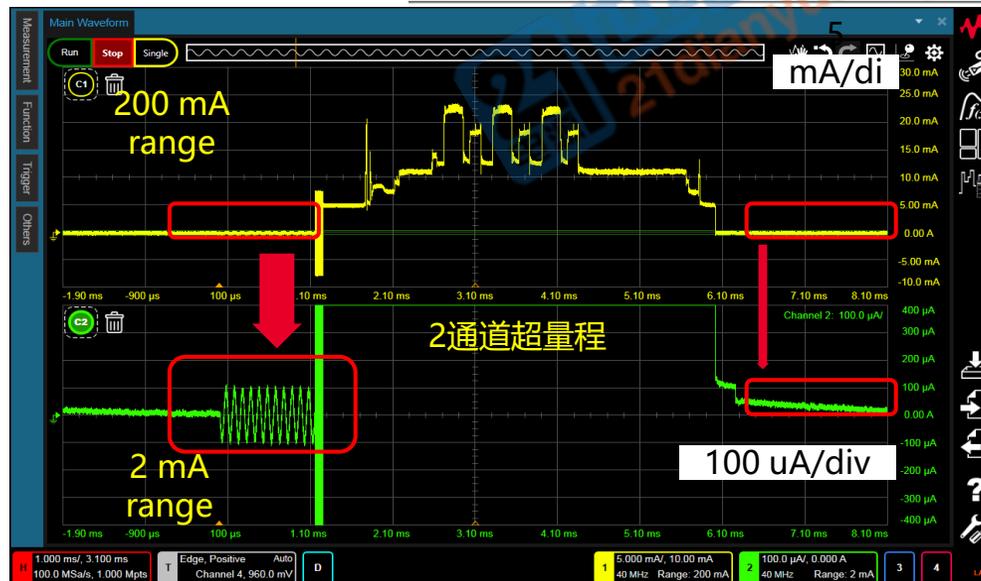
CX1102A 双量程探头



- ✓ 占用CX3300 两个通道
- ✓ 最大带宽: 100 MHz
- ✓ 量程范围: 40nA to 1A
- ✓ 浮地电压: +/-12V
- ✓ 支持更大的电流动态
- ✓ 配合转接头使用

更高动态电流测量 (100dB)

主通道		辅助通道		最大带宽 (-3 dB)	输入电阻 (典型值)
范围	噪声有效值 ¹	范围	噪声有效值 ¹		
1 A	2 mA	20 mA	20 μ A	100 MHz	410 m Ω
200 mA	0.2 mA	2 mA	3 μ A		
20 mA	20 μ A	200 μ A	500 nA	500 kHz	50 Ω
2 mA	2 μ A	20 μ A	200 nA		
20 mA ³	8 μ A ³	200 μ A ³	400 nA ³	90 kHz ³	
2 mA ³	1 μ A ³	20 μ A ³	40 nA ³	25 kHz ³	

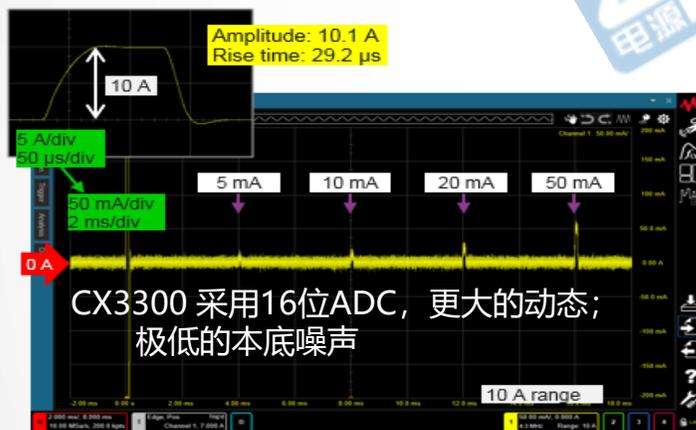


CX1104A大电流可选取样电阻值 (5.5mΩ-1.0Ω)

- Rshunt 大, 小电流测量分辨率、精度高; 但 Vdut 上压降大, 影响DUT工作。
- Rshunt 小, Vdut 上压降小; 但 小电流测量分辨难, 测试精度差。

Resistive Sensor Head	Range (Upper /Lower)	Typical R_{IN}^1	Noise (rms) @20 MHz NBW	Noise (rms) @2.5 kHz NBW ²
CX1211A	15.0 A 10.0 A	5.5 mΩ	48 mA 8.8 mA	1.6 mA 160 μA
CX1212A	10.0 A 5.0 A	8.0 mΩ	24 mA 4.4 mA	800 μA 80 μA
CX1213A	5.0 A 1.25 A	23 mΩ	6.0 mA 1.1 mA	200 μA 20 μA
CX1214A	3.0 A 500 mA	53 mΩ	2.4 mA 440 μA	80 μA 8.0 μA
CX1215A	2.0 A 250 mA	103 mΩ	1.2 mA 220 μA	40 μA 4.0 μA
CX1216A	250 mA 25 mA	1.0 Ω	120 μA 22 μA	4.0 μA 400 nA

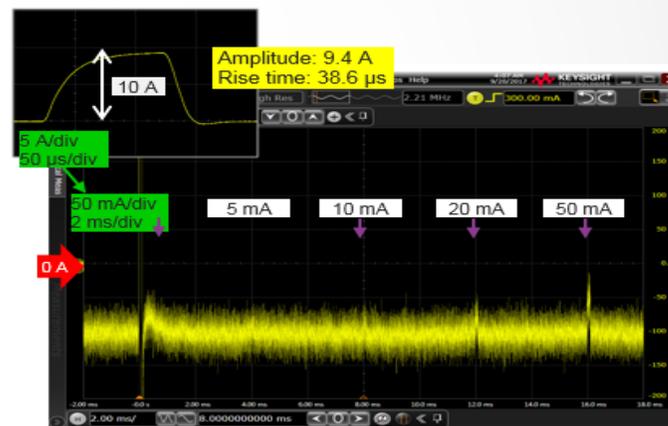
Keysight CX3324A with CX1104A/CX1121A ($R_{in}=5.5\text{ m}\Omega$)
(Measure with 10 MSa/s, 5 A/div)



CX3300 采用16位ADC, 更大的动态;
极低的本底噪声

- Clean 10 A pulse waveform
- Lower noise floor
- Smaller offset current

current probe
(Measure with 10 MSa/s, High Res, 5 A/div with Keysight a S-Series oscilloscope)



CX1105A 差分电压（电流）探头

直接使用电路板上的电阻取样

CX1105A			
Range	Noise (typ.; rms) @20 MHz NBW	Noise (typ.; rms) @2.5 kHz NBW	V _{CM}
2.5 V	1100 μ V	200 μ V	40 V
1 V	1100 μ V	200 μ V	
250 mV	45 μ V	3.0 μ V	6 V
100 mV	24 μ V	1.3 μ V	
25 mV	20 μ V	0.4 μ V	



高温探头 -50 °C to +150 °C



Optional user-defined resistor tip

Channel 1

Scale / Offset Sensor / Probe Skew / Delay

Range 25.00 mV

Voltage Range

2.5 V 1 V 40 V Max

250 mV 100 mV 25 mV 6 V Max

Display Current ON Resistor Value 5.000 mΩ

Coupling DC AC

6.250 mV, 0.000 A DC 89 MHz Range 25 mV

Display Current

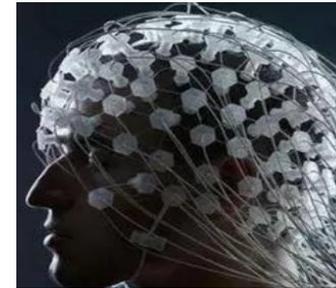
- Off: Unit = Voltage
- On: Unit = Current calculated by V_{diff} / Resistor Value

Off 1.00 mV 0.00 V -1.00 mV

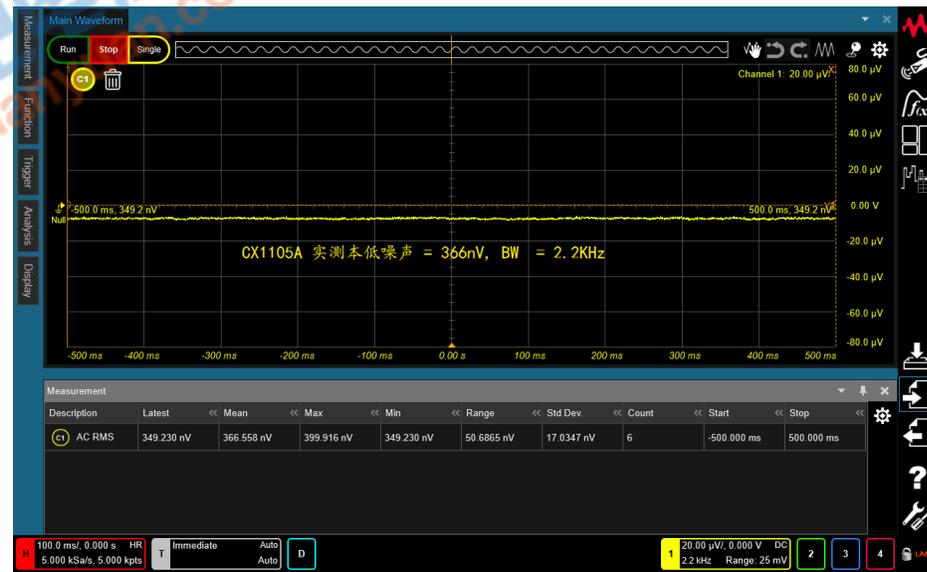
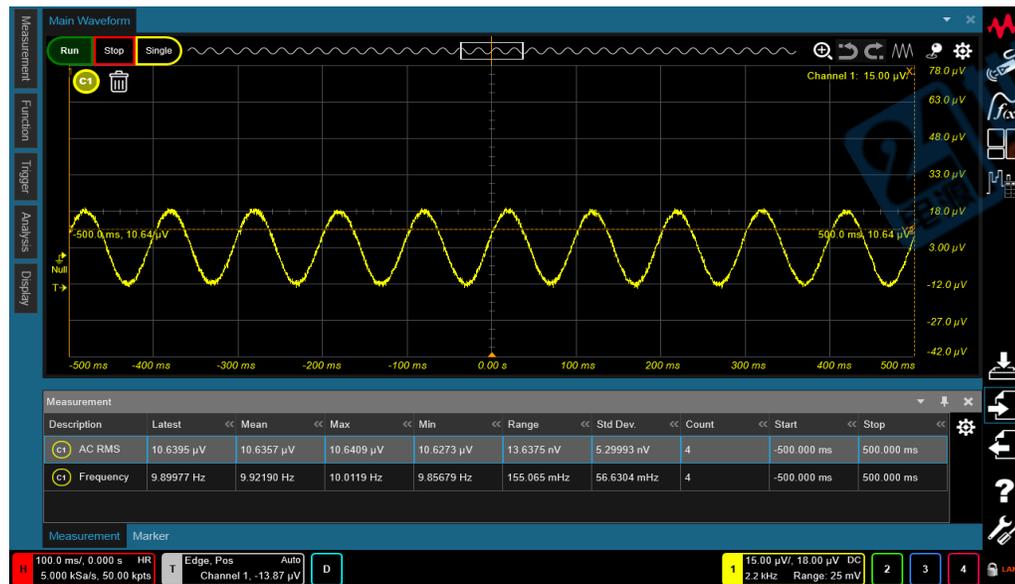
On 1.00 mA 0.00 A -1.00 mA

CX1105A 差分电压探头应用

脑电波电压信号量测



实测uV级别刺激电压信号数据:
信号幅度 (RMS) : 10.639uV
CX3300 + CX1105A本底噪声
(BW = 2.2KHz): 366nV



CX3300 数据记录仪 (Data logger)

数据记录仪 (Data Logger) 模式

- 长达100小时连续测试，采样率10MSa/秒，直接存储值外部硬盘
- 高效的数据分析 (超大数据分析, 譬如 12 小时 X 2MSa/s X 2通道 => 350 GB)
 - 快速数据文件加载 (如 350GB数据约5秒)
 - 支持趋势图表生成
 - 自动波形分类和区分

CX3300APPC 电流波形分析仪软件

- 客户端PC电脑上进行离线数据分析



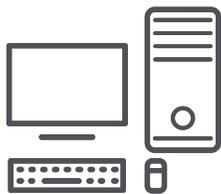
AI智能波形识别助力 “草堆寻针”

sampling rate	Duration (days)	Total samples	Data volume
1MSa/s	4	345G	691GB
10MSa/s	1	864G	1.7TB

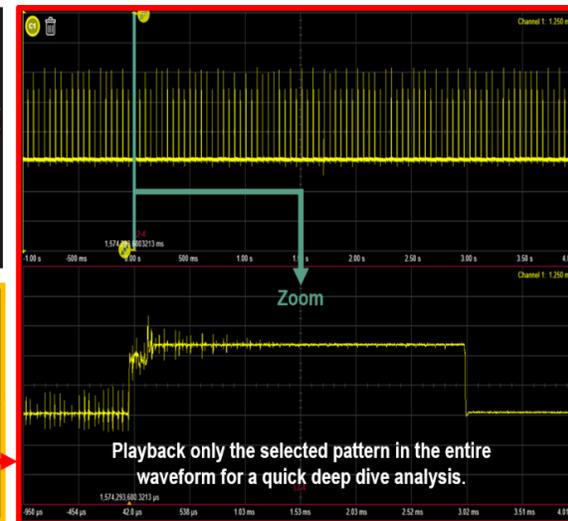
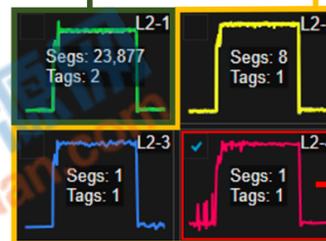
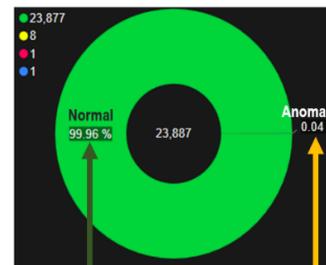


可能TB级别的波形文件

导入巨量的数据至外部PC



你能从这个数据文件中找出那个异常信号吗？多久？



- ✓以5MSa/S采样率连续捕获MCU在30分钟内的电流波形
- ✓从23887个波形中，发现和区分出10个不同类型的波形
- ✓通过统计分析，该波形出现概率为0.04%
- ✓发现MCU存在定期行的噪声干扰信号

Agenda

- 基于直流电源分析仪和源表的动态电流和功耗分析
- 更高带宽的动态小电流测量
- 演示

21世纪电源网
21dianyuan.com