

BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式

引言

BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 是超低功耗的 BLE 单模 SoC，符合 Bluetooth®规范。其架构核心是 32 位的 Cortex-M0+。

本应用笔记将介绍 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 设备的省电模式。

注意： 本文内容适用于 BlueNRG-LP 和 BlueNRG-LPS 设备。BlueNRG-LP 设备和平台的任何参考也适用于 BlueNRG-LPS 设备和平台。必要时，会着重标明具体的区别。

1 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式

为了在低功耗、短启动时间和可用唤醒源之间寻求最佳平衡，BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 硬件提供两种主要省电模式：

- Deepstop 模式
 - 系统和总线时钟均停止
 - 只有必要的数字电源区域工作，并以 1.0 V 供电
 - 存储区 RAM0 处于保留状态
 - 其他 RAM 存储区可以保留或不保留，具体取决于软件配置
 - 低速时钟可以运行或停止，具体取决于软件配置
 - ON 或 OFF
 - 时钟源来自 LSE 或 LSI
 - RTC 和 IWDG 保持活跃状态（如果启用，且低速时钟处于工作状态）
 - 在 BlueNRG-LPS 上，LPUART 保持活跃状态（前提是启用，且低速时钟处于工作状态）
 - 射频唤醒模块（包括其定时器）保持活跃状态（前提是启用，且低速时钟处于工作状态）
 - 如果低速时钟处于关闭状态，仅可以从 GPIO（BlueNRG-LP 上的 PA0 到 PA15，以及 PB0 到 PB11；BlueNRG-LPS 上的所有 GPIO）唤醒；如果低速时钟处于工作状态，则还可以从 RTC、IWDG 和 LPUART（仅限 BlueNRG-LPS）、射频模块和 Hal 虚拟定时器进行唤醒
 - 当上述源触发唤醒时，系统回到运行模式且所有外设启用。应用需等到高速晶振稳定后，才能从 deepstop 模式退出。
- Shutdown 模式
 - Shutdown 模式是功耗最小的模式。在 Shutdown 模式下，BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 处于超低功耗状态：所有稳压器、时钟和 RF 接口均关闭。
 - BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 可以通过内部软件序列进入 shutdown 模式。退出 shutdown 模式的唯一方法是对“RESET”引脚先进行置位再取消置位

请参考 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 数据手册了解所有省电模式的功耗。

2 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式支持

BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS DK 软件包提供的软件支持所有 BlueNRG-LPS 硬件省电模式。

省电软件（函数 HAL_PWR_MNGR_Request（））结合来自应用层 Radio 模块的操作模式的低功耗的请求，选择适用于当前情况的最佳省电模式。

射频模块和应用请求之间的协商防止数据丢失，并由省电软件执行。

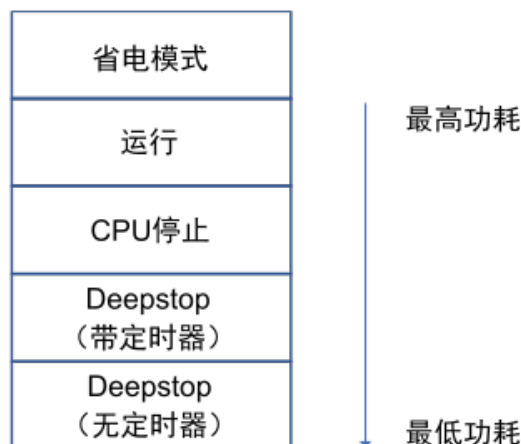
当 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 退出任何省电模式时，会发生复位：所有外设配置和应用上下文均会丢失。

省电软件采用一种机制，在省电程序被调用时保存并恢复所有外设配置和应用上下文。因此，从应用的角度来看，从低功耗程序退出是完全透明的：从省电模式唤醒时，CPU 继续执行省电函数被调用后的下一个指令。

省电软件执行下列省电模式：

- POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING
 - 在该省电模式下，一切处于激活并运行的状态。不会使用该模式，定义其的目的是确保信息的完整性：该模式并不属于真正的省电模式。
- POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT
 - 该省电模式执行 HW CPU-Halt 省电模式（只有 CPU 被停止）
- POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER
 - 该省电模式执行硬件 deepstop 模式（低速时钟开启）。器件处于深度睡眠状态，并且定时器时钟源（LSI 或 LSE）仍然保持运行。可以从 GPIO（BlueNRG-LP 上的 PA0 到 PA15，以及 PB0 到 PB11；BlueNRG-LPS 上的所有 GPIO）、RTC、IWDG 和 LPUART（仅限 BlueNRG-LPS）、射频模块和 Hal 虚拟定时器进行唤醒。
- POWER_SAVE_LEVEL_NOTIMER
 - 该省电模式执行硬件 deepstop 模式（低速时钟关闭）
 - 器件处于深度睡眠状态。所有外设和时钟源均关闭
 - 仅可以从 GPIO（BlueNRG-LP 上的 PA0 到 PA15，以及 PB0 到 PB11；BlueNRG-LPS 上的所有 GPIO）进行唤醒

图 1. BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式



为了启用任意省电模式，应用将调用函数 HAL_PWR_MNGR_Request():

```
uint8_t HAL_PWR_MNGR_Request(PowerSaveLevels level,
                             WakeupSourceConfig_TypeDef wsConfig,
                             PowerSaveLevels *negotiatedLevel)
```

其中

- **level** 是要启用的省电模式：
 - POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING
 - POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT
 - POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER
 - POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NOTIMER
- **wsConfig** 是唤醒时钟源配置
 - 它指定是否启用 RTC 唤醒源
 - 它指定是否启用 LPUART 唤醒源（仅适用于 BlueNRG-LPS）
 - 由其指定被配置为待唤醒的 IO，这些 IO 遇到低电平会退出睡眠。（如果没有使用低电平唤醒的 IO，则该参数须初始化为零）
 - 由其指定被配置为待唤醒的 IO，这些 IO 遇到高电平会退出睡眠。（如果没有使用高电平唤醒的 IO，则该参数须初始化为零）
- **negotiatedLevel** 返回实际生效的协商后省电级别：
 - POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING
 - POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT
 - POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER
 - POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NOTIMER

函数返回状态：

- **ERROR 代码**
- **SUCCESS**

省电软件导出对应用有用的其他函数：

- **HAL_PWR_MNGR_WakeupSource ()**
 - 该函数返回退出省电模式的最后一个唤醒源
- 返回值可以是以下值的组合：
 - BlueNRG-LP：PA0 - PA15，PB0 - PB11，RTC，射频，定时器；
 - BlueNRG-LPS：所有 GPIO 都能够唤醒系统，RTC，LPUART，射频，定时器

- **App_PowerSaveLevel_Check(PowerSaveLevels level)**
 - 该函数允许应用根据应用电源管理策略设置所需的睡眠模式。当用户调用 HAL_PWR_MNGR_Request() 时，应用输入的省电模式和系统的省电模式会发生一次协商，协商后会定义一个省电模式。App_PowerSaveLevel_Check() 允许重写由 HAL_PWR_MNGR_Request() 传递的省电模式参数。

该函数在中断被禁用的情况下执行：即没有中断处理程序可以执行或更改应用的状态，可能也无法执行或更改应用所需的省电模式。因此，当该函数被调用时，应用软件的状态是冻结。

该函数可在下例中使用：

```
/* Step 1. Application computes its desired power save mode */
powerSaveMode = computePowerSaveMode();
/* Step 2. Application calls HAL_PWR_MNGR_Request with its desired sleep mode */
HAL_PWR_MNGR_Request(powerSaveMode,...);
```

如果在第 1 步和第 2 步之间发生中断，则改变软件状态，且 computePowerSaveMode 返回不同的值；应用无法更改其电源管理策略。

如果应用重复进行 App_PowerSaveLevel_Check() 第 1 步中的检查，则将考虑第 1 步和第 2 步之间的任何变更。

关键区别在于，第二次检查在带中断屏蔽的 HAL_PWR_MNGR_Request() 内执行，并且在进入计算得出的省电模式之前，应用软件状态不会发生变化。

任何在 HAL_PWR_MNGR_Request() 发出中断屏蔽指令之后发生的中断和对 WFI 指令的调用都会导致 WFI 按 NOP 运行且系统跳过省电模式激活。此时，一旦重新使能，便会服务中断。

- **HAL_PWR_MNGR_ShutdownRequest(uint8_t BOR_enabled)**
 - 该函数允许 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 进入 shutdown 模式：唯一唤醒源是在芯片的 RSTN 焊盘上给一个低电平脉冲让芯片复位。
 - 进入 shutdown 模式的条件为：
 - 射频模块进入睡眠状态
 - CPU 进入睡眠状态（WFI，且 SLEEPDEEP 信息处于活跃状态）
 - 退出 shutdown 模式类似于 POR 启动。相关的复位原因是 PORRSTF 标志
 - 在 shutdown 模式下，可能启用或禁用 BOR 功能

2.1 GPIO 中断和唤醒源处理

处于 deepstop 模式时，BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS GPIO 外设被禁用。

因此，如果一个 IO 唤醒引脚上发生电平变化，器件便会被唤醒，但相关的中断丢失，因为未在上下文恢复前为外设提供时钟并进行配置。

为了正确地服务中断，应用还必须使用与中断相关的用户特定代码定义 HAL_PWR_MNGR_WakeupIOcallback() 回调函数。

示例：设唤醒源是 PA10，用户应用程序需要对相关的 IRQ 函数（GPIOA_IRQHandler()）执行特定操作。

在主应用上，用户将 PA10 设为唤醒源来启用省电模式：

```
static WakeupSourceConfig_TypeDef wakeupIO = {0,0, WAKEUP_PA10,0};
```

在相关的 PA10 IRQ 处理程序（GPIOA_IRQHandler(void)）上，用户添加特定于应用程序的代码，允许处理中断：

```

/* GPIOA_IRQHandler */
void GPIOA_IRQHandler(void)
{
    <if PA10 pending bit is set>
    {
        <clear pending bit>

        /* Run the set of user actions associated to the interrupt */
        <DO_USER_SPECIFIC_ACTION>
    }
}

```

因为 PA10 也是一个带相关中断的唤醒源，为了正确处理在器件 deepstop 模式下发生中断的情况，用户还必须定义以下回调函数，以允许器件正确执行所请求的与中断相关的用户特定操作：

```

/* User callback to be called if an interrupt is associated to a wakeup source */
void HAL_PWR_MNGR_WakeupIOCallback(uint16_t source)
{
    if (source & WAKEUP_PA10)
    {
        /* Run the set of user actions associated to the interrupt */
        <DO_USER_SPECIFIC_ACTION>
    }
}

```

3 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式示例

下面几个章节提供了一些省电模式的应用用例。

3.1 POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING

在该省电模式下，一切处于激活并运行的状态：这实际上不是省电模式。典型源代码如下：

```
WakeupSourceConfig_TypeDef wakeupIO;
PowerSaveLevels stopLevel;

/* No Wakeup Source needed */
wakeupIO.IO_Mask_High_polarity = 0;
wakeupIO.IO_Mask_Low_polarity = 0;
wakeupIO.LPU_enable = 0;
wakeupIO.RTC_enable = 0;
while(1) /*main loop*/
{
    /* Modules ticks */
    ModulesTick();
    /* Application Tick */ APP_Tick();
    /* Power Save management */
    HAL_PWR_MNGR_Request(POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING, wakeupIO, &stopLevel);
}

```

该省电模式无需唤醒源。

3.2 POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT

在该模式下，只有 CPU 停止工作。所有外设继续运行并可在发生中断时唤醒 CPU。典型源代码如下：

```
WakeupSourceConfig_TypeDef wakeupIO;
PowerSaveLevels stopLevel;

/* No Wakeup Source needed */
wakeupIO.IO_Mask_High_polarity = 0;
wakeupIO.IO_Mask_Low_polarity = 0;
wakeupIO.LPU_enable = 0;
wakeupIO.RTC_enable = 0;
while(1) /*main loop*/
{
    /* Modules ticks */
    ModulesTick();
    /* Application Tick */ APP_Tick();
    /* Power Save management */
    HAL_PWR_MNGR_Request(POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT, wakeupIO, &stopLevel);
}

```

在该省电模式下，唯一的唤醒源是外设中断。

如果射频操作模式正在执行不能停止的操作，从而不允许此低功耗请求，则软件内部自动将此省电模式转换为 POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT。

3.3 POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER

在该低功耗模式下，CPU 停止且所有外设均被禁用。只有定时器时钟源（LSI 或 LSE）和外部唤醒源模块还在运行。可以通过外部唤醒源、RTC、IWDG、radio 器件和 Hal 虚拟定时器进行唤醒。典型源代码如下：

```

VTIMER_HandleType TimerHandle;
WakeupSourceConfig_TypeDef wakeupIO = {0,0, WAKEUP_PA8, 0};
PowerSaveLevels stopLevel
/* Starts the virtual timer with timeout 2 sec. */
HAL_VTimerStart_ms(TimerHandle, 2000);
while(1) /*main loop*/
{
    /* Modules ticks */
    ModulesTick();
    /* Application Tick */ APP_Tick();
    /* Power Save management */
    HAL_PWR_MNGR_Request(POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER, wakeupIO, &stopLevel);
}

```

唤醒源是具有低极性电平的 PA8（检测到下降沿就会触发唤醒事件）；应用会设置一个虚拟定时器，以便在发生 2 秒超时唤醒系统。

在该场景下，应用启用省电模式 POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER。如果射频操作模式处于连接状态或广播状态，则协议栈接受应用请求的省电模式，也可在必要时于应用超时之前唤醒系统，以符合连接间隔时间配置文件或符合广播间隔时间配置文件。

3.4 POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NO_TIMER

在该省电模式下，CPU 停止且所有外设均被禁用。仅外部唤醒源模块还在运行。

典型源代码如下：

```

WakeupSourceConfig_TypeDef wakeupIO = {0, 0, WAKEUP_PA10, 0};
PowerSaveLevels stopLevel;
while(1) /*main loop*/
{
    /* Modules ticks */
    ModulesTick();
    /* Application Tick */
    APP_Tick();
    /* Power Save management */
    HAL_PWR_MNGR_Request(POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NO_TIMER, wakeupIO, &stopLevel);
}

```

唤醒源是具有低极性电平的 PA10（检测到下降沿就会触发唤醒事件）。

在该场景下，应用启用省电模式 POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NO_TIMER。如果射频模块处于连接状态，在与协议栈协商后，软件将省电模式更改为 POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER，以符合连接时间配置文件。如果射频模块处于空闲状态，协议栈将接受应用请求的省电模式 POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NO_TIMER，并且省电软件不更改模式。

4 电流消耗测量测试场景

本章节描述一个功耗演示应用程序，支持在蓝牙低功耗广播和连接阶段显示标准的电流消耗测量值。

为了进行这些测量，使用以下配置（BlueNRG-LP，STEVAL-IDB011V1 开发套件）：

- **硬件：** STEVAL-IDB011V1
- **固件：** 在 STSW-BRNGLP-DK、BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 软件包中发布的 BLE_Power_Consumption 测试应用程序
- **电源：** 3.3 V
- **Tx 功率：** 0 dBm
- **保留：** 保留全部 64 kB 的 RAM 内容
- **晶振启动时间：** 780 μ s
- **系统时钟：** 直接 HSE 配置
- **BLE 时钟：** 16 MHz
- **广播间隔：** 100 ms 和 1000 ms，数据包长度 28 字节
- **连接间隔：** 100 ms 和 1000 ms，用空数据包

BLE_Power_Consumption 测试应用程序将 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 配置为蓝牙低功耗（LE）从机。

其包含在 BLE_Examples 文件夹“项目”的 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS DK 软件包中。

蓝牙低功耗主设备角色由另一个 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 器件担任，该器件配置了同一文件夹中的 DTM 固件应用程序，并运行 BLE_Power_Consumption 应用文件夹中提供的一些作为主机的脚本。

这些脚本允许将 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 设备配置为蓝牙低功耗主设备，并创建与测试阶段 BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 的连接。这些脚本运行时使用 BlueNRG GUI 软件包（STSW-BNRGUI）中的 BlueNRG-GUI。

将直流功率分析仪连接到 STEVAL-IDB011V1 探针，可以测量电流消耗值。

表 1. BlueNRG-LP 电流消耗值

蓝牙低功耗场景	真实的电流消耗
广播间隔：100 ms	137.898 μ A
广播间隔：1000 ms	15.412 μ A
连接间隔：100 ms	69.546 μ A
连接间隔：1000 ms	8.816 μ A

下图显示了采用以上两种时间间隔时的广播过程快照（数据包长度为 28 字节）。

图 2. BlueNRG-LP 广播过程：间隔 100 ms

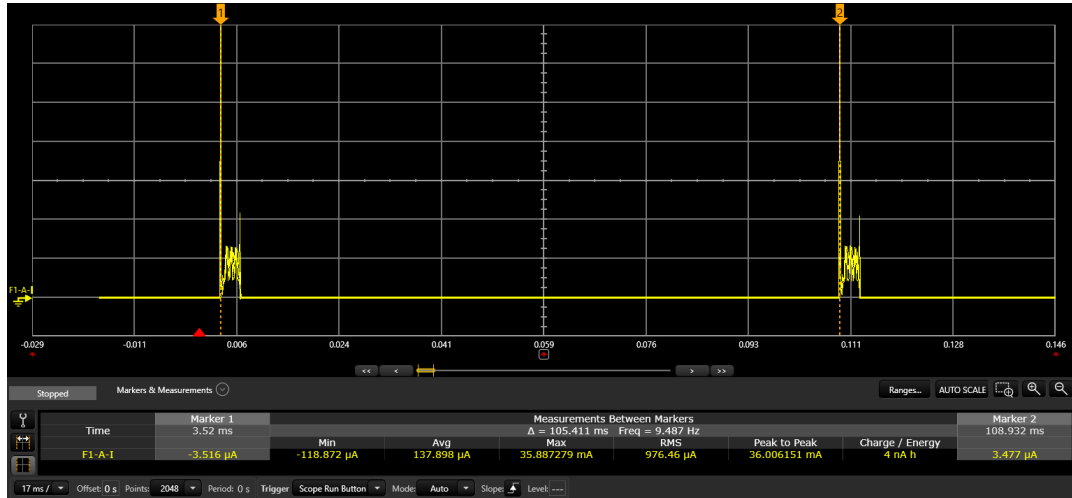
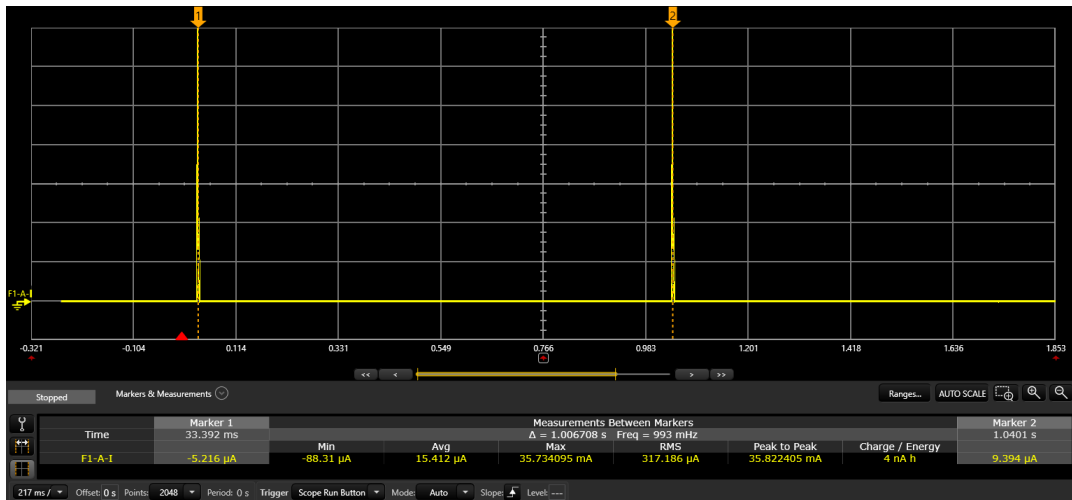


图 3. BlueNRG-LP 广播过程：间隔 1000 ms



下图显示了采用以上两种时间间隔时的连接过程快照（采用空数据包）。

图 4. BlueNRG-LP 连接过程：间隔 100 ms

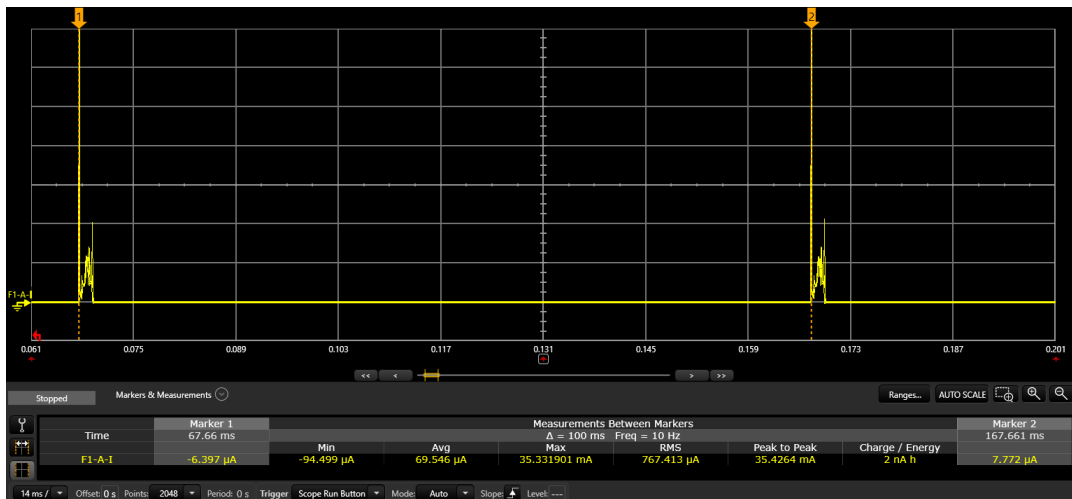
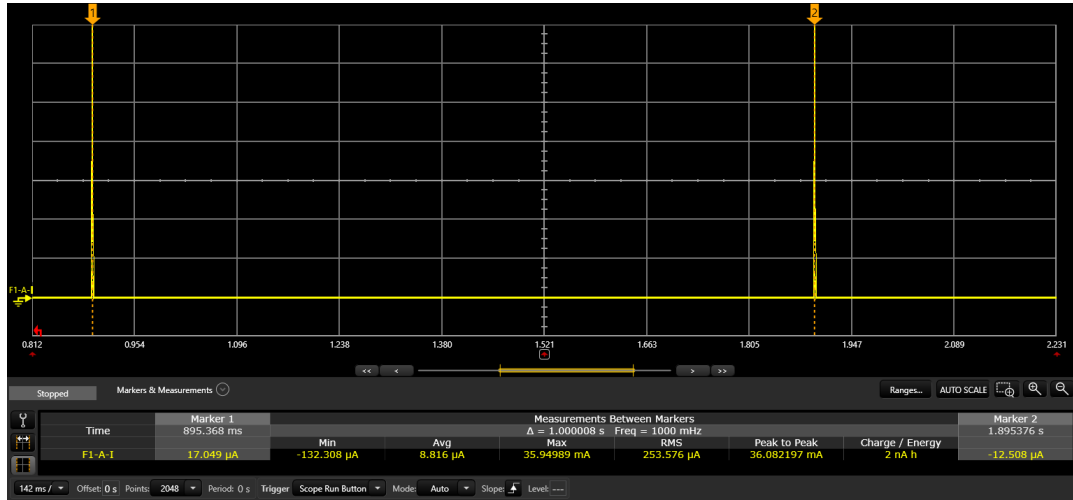


图 5. BlueNRG-LP 连接过程：间隔 1000 ms



版本历史

表 2. 文档版本历史

日期	版本	变更
2020 年 7 月 13 日	1	初始版本。
2022 年 4 月 6 日	2	更新了： 第 1 节 “BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS HW 省电模式”； 第 2 节 “BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式支持”； 第 2.1 节 “GPIO 中断和唤醒源处理”； 第 3.1 节 “POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING”； 第 3.2 节 “POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT”； 第 3.4 节 “POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NO_TIMER”； 第 4 节 “电流消耗测量测试场景”。 增加了对 BlueNRG-LPS 器件的引用。

目录

1	BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式	2
2	BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式支持	3
2.1	GPIO 中断和唤醒源处理	5
3	BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式示例	7
3.1	POWER_SAVE_LEVEL_RUNNING	7
3.2	POWER_SAVE_LEVEL_CPU_HALT	7
3.3	POWER_SAVE_LEVEL_STOP_WITH_TIMER	7
3.4	POWER_SAVE_LEVEL_STOP_NO_TIMER	8
4	电流消耗测量测试场景	9
	版本历史	12

表格索引

表 1.	BlueNRG-LP 电流消耗值	9
表 2.	文档版本历史	12

图片目录

图 1.	BlueNRG-LP、BlueNRG-LPS 省电模式.....	3
图 2.	BlueNRG-LP 广播过程：间隔 100 ms.....	10
图 3.	BlueNRG-LP 广播过程：间隔 1000 ms.....	10
图 4.	BlueNRG-LP 连接过程：间隔 100 ms.....	10
图 5.	BlueNRG-LP 连接过程：间隔 1000 ms.....	11

重要通知 - 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司（“意法半导体”）保留随时对 ST 产品和/或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于意法半导体产品的最新信息。意法半导体产品的销售依照订单确认时的相关意法半导体销售条款。

买方自行负责对意法半导体产品的选择和使用，意法半导体概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

意法半导体不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的意法半导体产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致意法半导体针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 标志是意法半导体的商标。关于意法半导体商标的其他信息，请访问 www.st.com/trademarks。其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2023 STMicroelectronics - 保留所有权利