



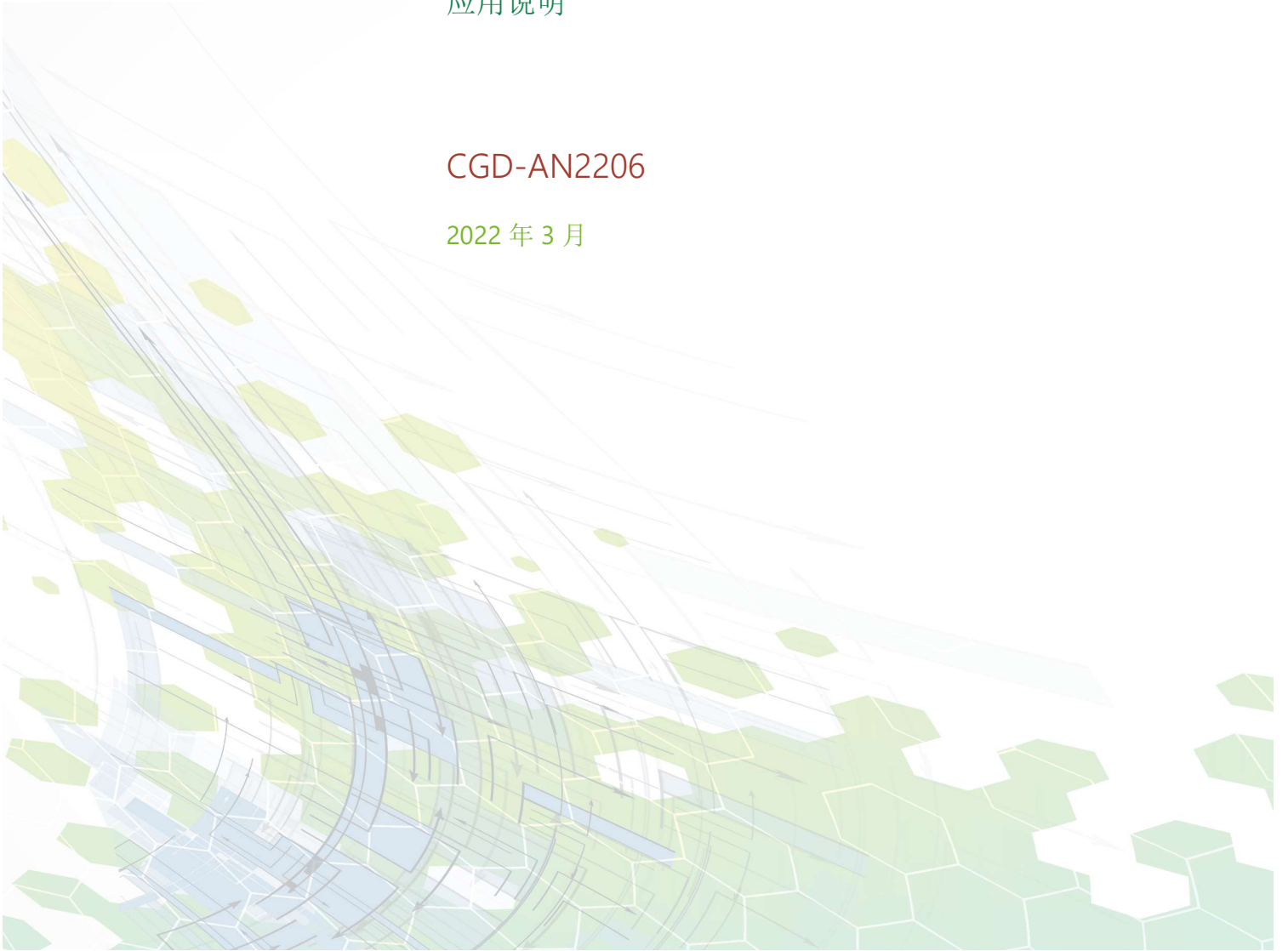
---

## ICeGaN™ 电流感测

应用说明

CGD-AN2206

2022 年 3 月



# ICeGaN™ 电流感测

## CGD-AN2206

2022 年 3 月

### 作者

**JOHN FINDLAY**

应用工程师

**PAUL RYAN**

系统架构师

**CHRISTOPHER RICHARDSON**

应用工程师

### 本应用说明中包含

03 摘要 & ICeGaN™ 概述  
ICeGaN™ 技术和功能简介

04 简介  
ICeGaN™ 电流感测功能概述

05 电流感测功能优势  
最大化热性能和效率

07 使用内置电流感测功能  
使用 CGD ICeGaN 的设计实例

12 结论  
最大化功率转换产品性能

13 参考文献 & 附录



[www.camgandevices.com](http://www.camgandevices.com)

### Cambridge GaN Devices Limited

Deanland House  
160 Cowley Road  
Cambridge  
CB4 0DL

### Cambridge GaN Devices Ltd.财产

版权所有 © 2022 Cambridge GaN Devices Limited, 160 Cowley Road,  
Cambridge CB4 0DL。

注册商标®。保留所有权利。

未经版权所有方事先同意，不得复制、转载、修改、合并、翻译、储存  
或使用此处展示的资料。上述所有产品和组别均为其所属组织的商标或  
注册商标。

## 摘要

概述使用集成在 ICeGaN™ 版本中的电流感测功能的优势，包括如何将 CGD ICeGaN™ 器件集成到设计中以及如何选择和使用运算放大器获得最佳感测性能的指南。

## ICeGaN™ 概述

ICeGaN™ 是“Integrated Circuit Enhancement GaN，集成电路增强 GaN”的缩写词。这是一个基于增强 GaN HEMT 的平台，旨在凭借其超低比导通电阻和非常小的电容，在降低损耗和工作温度方面获得超越其他 MOS 解决方案的表现。ICeGaN™ 最得应用工程师青睐的优势在于，它可类似于驱动硅 MOSFET 的方法驱动，这意味着与所有其他增强 GaN 解决方案不同，ICeGaN™ 可与任何硅基驱动器兼容。CeGaN™ 反向恢复损耗为零，输出电荷极低，是高频高效率应用的理想选择。

目前市面上实现 e-mode GaN 的方法有两种，一是分立法，二是单片法，其中栅极驱动器是完全集成的。这两种解决方案各有缺陷。p-GaN 增强模式器件特定的低阈值电压（*Ohmic p-GaN 栅极解决方案* ~1.2 V，*肖特基 p-GaN 栅极器件* 1.7 V）要靠负驱动电压来限制高 dV/dt 瞬态期间发生 HEMT 假导通事件。另一方面，完全集成驱动器的做法，虽然能够减轻寄生效应，但也会牺牲掉使用低成本高性能硅基驱动器或集成了强大控制器的栅极驱动器的灵活性。此外，因为片上热耦合会导致功率器件自发热，栅极驱动器会有额外的损耗。全集成解决方案能否实现功率升级也令人怀疑。

相比之下，ICeGaN™ 器件具有较高的阈值电压， $V_{th} \approx 3 \text{ V}$ ，可抑制与 dV/dt 相关的虚假导通事件，提供更加安全的操作。此外，ICeGaN™ 器件可用高达 20 V 的栅级电压（远远超过增强模式 p-GaN HEMT 仅 7 V 的标准电压）驱动，并且器件的跨导或动态性能不会受到任何影响。

有关 ICeGaN™ 驱动的更多信息，请查看我们的设备数据表。

## 简介

ICeGaN™ 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 通过一个专用引脚 CS 集成独立的电流感测输出功能。这一独特功能可简化电流感测，同时也能改善热管理。为获得最佳电流感测精度，推荐使用运算放大器来调节感测电流信号，以便与目前市场上大多数开关电源 (SMPS) 控制器连接。本应用说明提供了设计指南，便于用户选择运算放大器，对其进行适当配置，并在开关转换器中充分发挥 ICGaN™ 优势。

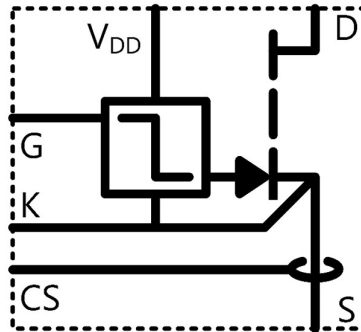


图 1——ICeGaN 图示

引脚	名称	功能
D	漏极	高电流连接
S	源极	高电流连接。在 CGD ICGaN™ 器件中，DFN 封装的源极焊盘也是芯片散热的主要途径。
V <sub>DD</sub>	V <sub>dd</sub>	用于运行内部功能的低压电源 (9-20 V)
G	栅极	器件栅极引脚 V <sub>GS</sub> 0 - 20 V
CS	电流感测	电流感测信号输出
K	开尔文	与高电流 S 引脚并联的源极节点连接。用于消除源路径上的阻抗干扰。

表 1——ICeGaN 器件的引脚功能

QR 反激式评估板采用准谐振反激式拓扑结构和 DFN5x6 封装的 ICGaN™ 200 mΩ R<sub>DS(on)</sub> HEMT。这是一个证明电流感测计算的良好示例，贯穿整个应用说明文件。有关 PCB 评估板的详情，请参见 [1]。

## 电流感测功能优势

电流感测功能可避免在主电源电流路径上串联额外的高电流组件，具有以下优势：

- 可避免由于额外组件的电阻/阻抗而引起额外的功率耗散。
- 在低侧开关应用中，ICEGaN™ 开关的源极焊盘可与 0 V 系统以及 PCB 的 0 V 覆铜平面连接。

最后一项优势非常有利于器件散热；ICEGaN™ 芯片的主要散热路径是通过与 DFN 封装的大尺寸源极焊盘连接进行散热，而集成电流感测功能可使该焊盘处于 0 V 主系统中——通常为低侧应用中最大的覆铜散热区域。

在这些应用中，通常使用一个“外部”电流感测 (CS) 电阻与功率开关晶体管的源极串联。相比之下，集成 ICEGaN™ CS 功能可使源极与 0V 主系统保持连接。参见下图 图 2 和 图 3。

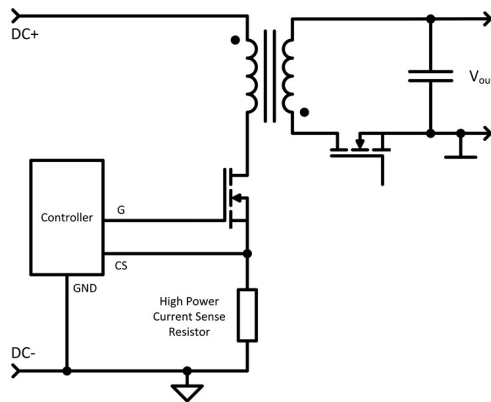


图2——传统“外部”CS电阻

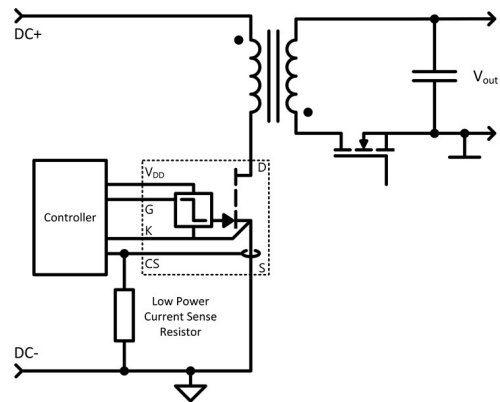


图3——ICEGaN™集成CS功能

器件连接准则

0V 系统通常是 PCB 中最大的连续覆铜区域，也是器件散热的最佳途径。如果使用外部 CS 电阻，源极连接引起的电气隔离会极大地限制可用于散热的覆铜区域。但集成 ICEGaN™ CS 功能意味着可使用 0V 系统的覆铜区域，从而优化散热，实现更小的整体尺寸和/或使用具有更高  $R_{DS(ON)}$  且体积更小的晶体管。通过比较图 4 和 图 5，可看出对 PCB 布局的影响。更多详情请参见 [2]。

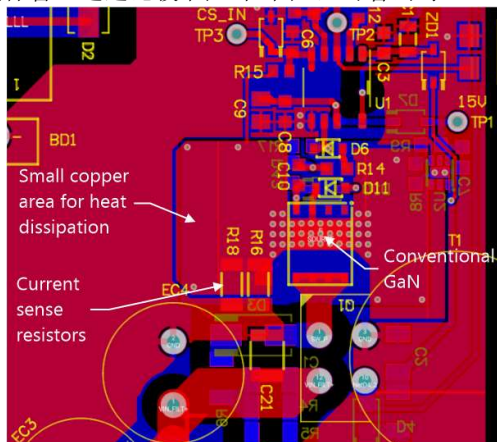


图4——外部CS电阻PCB布局

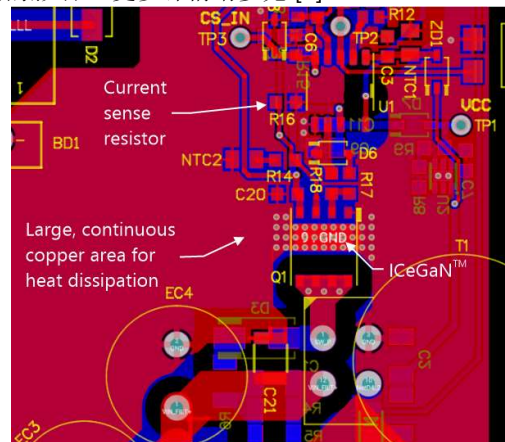


图5——ICEGaN™CS功能PCB布局



## 使用内置电流感测功能

该集成功能可为功率控制器产生电流感测信号。从 CS 引脚到开尔文或源极引脚，都可添加一个外部电阻，从而优化信号特性，如图 8 所示。

### CS 低电压输出模式——信号振幅和感测精度

建议在“低电压输出模式”下使用 ICeGaN™ 电流感测输出，从而获得最佳感测精度。其中 CS 引脚与低值电阻 ( $R_{CS}$ ) 到源极的负载相连接，并使用放大器来提供控制器所需的 CS 信号振幅。

$R_{CS}$  值可决定标称灵敏度，影响感测精度；因此需要在 CS 信号振幅和感测精度之间找到一个平衡点。在给定的漏极电流下，较大电阻值可得到较高的信号振幅，但会造成精度降低且温度系数升高。

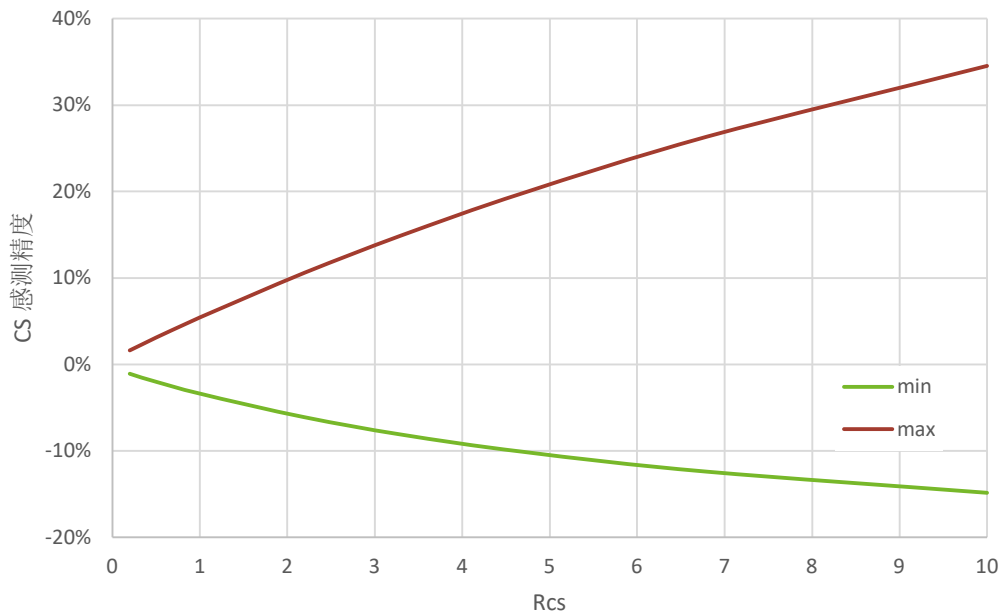


图6——电流感测精度0~125°C，25°C 标称值，200 mΩ ICeGaN™

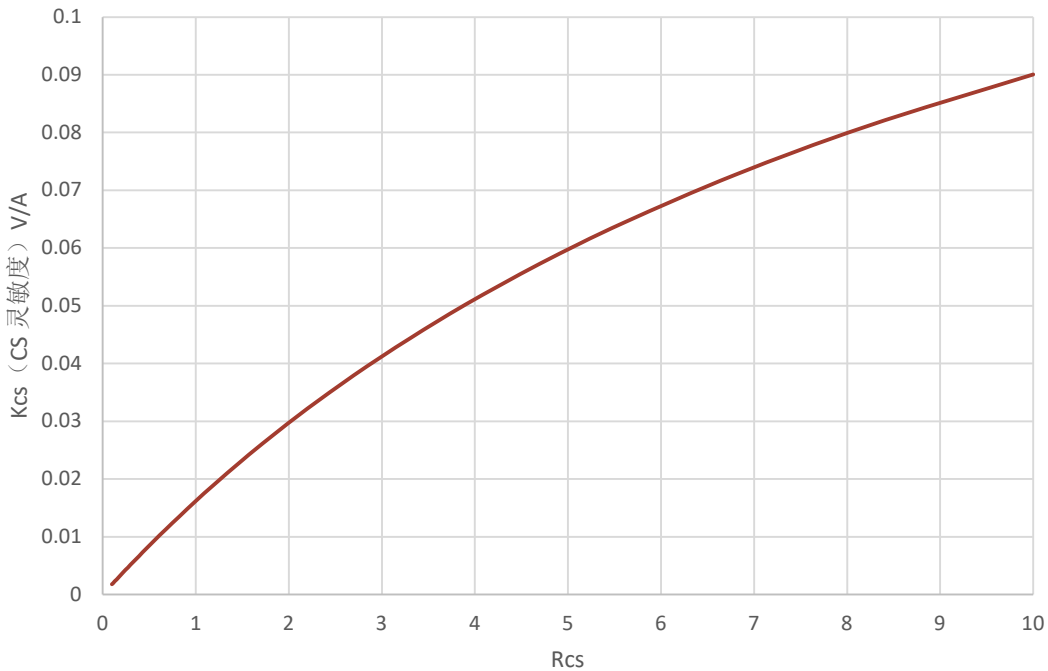


图 7——25 ° C 标称值，200 mΩ ICeGaN™ 条件下的电流感灵敏度

图 6 和 图 7 为 ICeGaN™200 mΩ 器件，本应用说明以该器件为例（有关其他 ICeGaN™ 器件的详情，请联系 CGD）。说明外部电阻（从 CS 到源极连接的  $R_{CS}$ ）值之间的关系。

- 感测精度（灵敏度随温度和器件公差的变化而产生偏差）
- 标称感测灵敏度（每安培漏极电流的 CS 信号振幅）

参考图 6，应选择能为应用提供足够精度的  $R_{CS}$  最大值。然后，利用选定的  $R_{CS}$  值从图 7 中寻找有效的标称灵敏度（“ $K_{CS}$ ”）。参见附录中的特性表。

QR 反激式评估板的  $R_{CS}$  为 1.8 Ω，公差为 -5% / +9%，CS 灵敏度为  $K_{CS} = 27 \text{ mV/A}$

### 在低电压输出模式中使用运算放大器

采用低值负载电阻可提高感测精度，信号振幅也会相应降低。建议使用放大器来提供典型控制器所需的信号振幅。



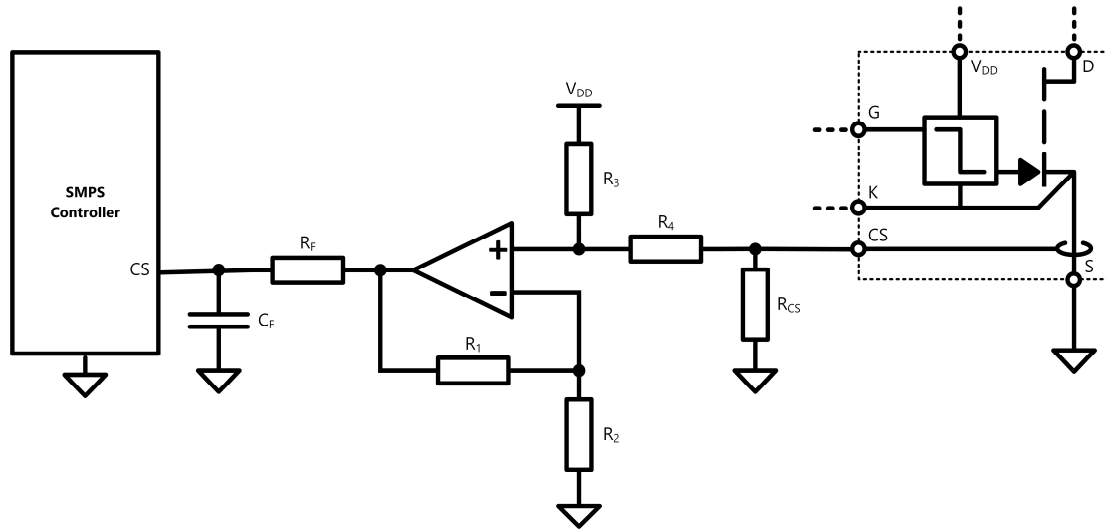


图 8——推荐的 CS 电路

图 8 显示了放大器配置的概要示意图。R<sub>CS</sub> 表示从 CS 到源极的负载电阻，放大器通过增益率增加信号振幅：

$$G_{OP-AMP} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (1)$$

由于 R<sub>CS</sub> 信号电压可能很低，因此需要尽量减小放大器参考节点（R<sub>2</sub> 的接地连接）和 ICeGaN™ 的源极节点之间的电压差，这一点至关重要。PCB 布局安排应尽量使 CS & 源极引脚和放大器输入电路保持紧凑。同时也要注意，ICeGaN™ 产生的热量可能会影响电阻或运算放大器。

### 设置增益和选择运算放大器

在 QR 反激式评估板中使用 Onsemi NCP1342 控制器（参见 [3]），其峰值电流感测电压为 800 mV（最小公差为 760 mV），如果将电阻与传统电流感测初级 FET 源极串联，则该值为：

$$R_{SENSE} = \frac{V_{SENSE-PK}}{I_{D-PK}} \quad (2)$$

QR 反激式评估板的峰值电流为 2.68 A，因此方程 2 的结果为 283 mΩ。

根据感测精度选择 R<sub>CS</sub> 后，即可从平均灵敏度开始计算运算放大器的必要增益，根据所使用的电阻值（见页面 7）和通过方程 2 计算得到的感测电阻 R<sub>SENSE</sub> 以得到 K<sub>CS</sub>。再次以 QR 反激式评估板为例：

$$Target\ G_{OP-AMP} = \frac{R_{SENSE}}{K_{CS}} = \frac{283\ m\Omega}{27\ mV/A} = 10.5 \quad (3)$$

任何选择的放大器增益都不应该超过该数值，超过该数值可能导致过早触发电流限制。为 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 选择适当的电阻值，得到实际增益：

$$G_{OP-AMP} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{2.0\ k\Omega + 220\ \Omega}{220\ \Omega} = 10.1 \quad (4)$$

所对应的有效电流灵敏度为：

$$Effective R_{sense} = K_{CS} \times G_{OP-AMP} = 27 \text{ mA/V} \times 10.1 = 273 \text{ m}\Omega \quad (5)$$

所选择的运算放大器类型为：

- 与控制器和/或 ICeGaN™ V<sub>DD</sub> 应用中使用的电源电压兼容，通常为 9 ~ 20 V
- 低电源电流——注意，在转换器启动期间，放大器需要保持运行状态，并尽量减少待机功耗
- 输入和输出电压降至零——注意，在漏极电流为零时，CS 电压为零
- 低偏移电压——在 R<sub>CS</sub> 值较低的情况下，CS 信号弱，例如在 QR 反激式评估板中，峰值电流为 2.7A，灵敏度为 27 mV/A，导致峰值电压仅为 73 mV。因此需要更低的偏移电压以保证精度。偏移电压取决于控制器特性。
- 在关键条件下，应尽快响应电流信号增强和减弱速度。

运算放大器速度主要取决于转换器特性，尤其是在功率运行模式下。在非连续导通模式 (DCM) 中，电流上升相对较慢，虽然下降速度很快，但控制器通常不会在此时进行感测。因此，只需适当调快运算放大器的速度。然而，在连续导通模式 (CCM) 中，电流信号在开关开启时会迅速增强，因此运算放大器的响应速度必须足够快。CCM 运行通常需要一个比 DCM 更快的运算放大器。在 CCM 模式下，必须检查特定控制器的应用特性和要求。

还需要进一步考虑 DCM 和 CCM 应用中的故障/过载保护。需要对应用行为进行评估，确定必要的 CS 响应速度，同时检测是否存在过高的功率开关电流，保护电路。此要求可能需要确定放大器的必要响应速度，而不是正常运行速度。

检查完数据表信息（如转换速率和阶跃响应）后，根据模拟和测试结果选择放大器。

开关开启和关闭时，ICeGaN™ 的电流信号通常会发生快速瞬变。通常无需将这些信号保存为控制器信号，因此没必要使用具有高带宽的运算放大器进行响应。在大多数传统的电流感测电路中，电流检测电阻和控制 IC 的电流感测输入引脚之间配有一个 R-C 滤波器，用于减少这种瞬态的发生。典型值为 1 至 10 kΩ，100 至 1000 pF。在 CGD-ASYEVB002 中使用的 ON NCS2005 运算放大器中，GBW 为 8.5 Mhz，当所使用增益为 10 时，闭环带宽约为 800 kHz。如图 9 所示，这种低通滤波效果可减少瞬态和振铃的发生。

### 推荐的运算放大器

制造商和经销商所提供的运算放大器选择表一般包括轨至轨输入和输出的参数选择、转换速率、带宽和电源电压范围列表。评估 PCB 中使用的放大器参数如下。也可提供其他合适的替代方案，并根据应用具体情况加以选择。

产品型号	制造商	V <sub>CC</sub> 范围 (V)	最小共模输入 (V)	转换速率 (V/μs)	带宽 (MHz)	封装
NCS2005SN1T1G	Onsemi	2.2 - 32	-0.1	2.8	8.5	SOT23-5

表 2——电流感测 ICeGaN 所使用的推荐运算放大器

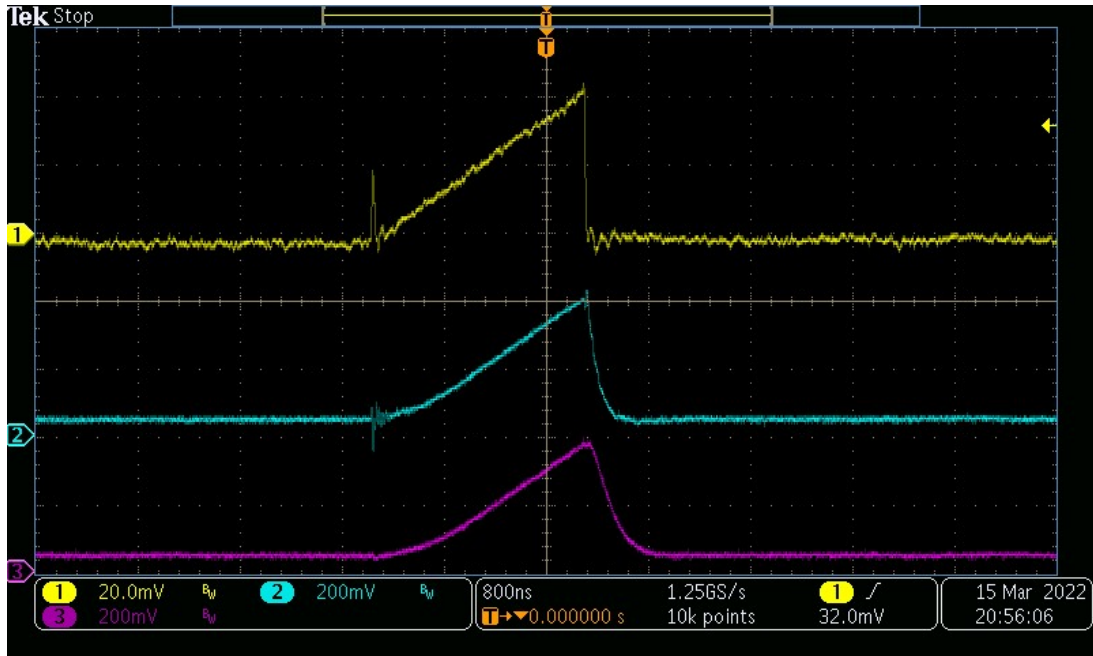


图9—— $10\ \Omega$  CS 到 K 电阻的电流灵敏度 $2\ \mu\text{s}/\text{div}$ 。

CS 引脚输出——黄色 (20 mV/div)，运算放大器输出——蓝色 (200 mV/div)，控制器 CS 输入引脚——紫色 (200 mV/div)。

## 结论

与 MOS 功率晶体管和其他氮化镓 HEMT 相比，ICeGaN™ 集成电流感测功能可消除典型的串联感测电阻，使源极直接连接到 0V 系统，从而实现卓越的热管理。从高电流路径中消除串联感应电阻可提高功率效率和功率密度。通过放大器和集成 ICeGaN™ 电流感测功能，可将最佳电流感测信号提供给应用控制器。

本文提供了一种应用设计的方法和特征曲线，以 QR 反激式转换器中的 CGD 200 mΩ 器件为例进行了说明。使用其他 CGD ICeGaN™ 器件进行设计时，可参考各自数据表中的特性。

## 参考文献

- [1] Cambridge GaN Devices Ltd, “CGD-UG2203 User Guide - QR Flyback Evaluation,” 03 2022. [联机]. Available: <https://camgandevices.com/>. [访问日期: 07 03 2022].
- [2] Cambridge GaN Devices, “Thermal Advantages of ICeGaN™,” 03 2022. [联机]. Available: [www.camgandevices.com](http://www.camgandevices.com). [访问日期: 11 03 2022].
- [3] Onsemi, “NCP1342: Quasi-Resonant Flyback Controller with Valley Lock-Out Switching,” 02 2022. [联机]. Available: <https://www.onsemi.com/products/power-management/ac-dc-power-conversion/offline-controllers/ncp1342>. [访问日期: 17 3 2022].
- [4] Cambridge GaN Devices, “CGD65B200S2 Datasheet,” 03 2022. [联机]. Available: [www.camgandevices.com](http://www.camgandevices.com). [访问日期: 07 03 2022].

## 附录

CGD 200 mΩ ICeGaN™ 的  $R_{CS}$ 、 $K_{CS}$  和精度表

Rcs 欧姆	Kcs (CS 灵敏度) V/A	公差 0~125C	
		最小	最大
0.68	0.011	-2.5%	3.9%
0.82	0.013	-2.9%	4.6%
1	0.016	-3%	5%
1.2	0.019	-4%	6%
1.5	0.023	-5%	8%
1.8	0.027	-5%	9%
2.2	0.032	-6%	11%
2.7	0.038	-7%	13%
3.3	0.044	-8%	15%
3.9	0.050	-9%	17%
4.7	0.057	-10%	20%
5.6	0.064	-11%	23%
6.8	0.073	-12%	26%
8.2	0.081	-14%	30%
10	0.090	-15%	35%

## 修订记录

修订号	备注	工程师	日期
1.0	初版	JF、PR、CR	2022/03/17



## 勇于创新

### 主要联系人

#### **GIORGIA LONGOBARDI**

创始人兼首席执行官

+44 1223 425185

[www.camgandevices.com](http://www.camgandevices.com)

英国剑桥

#### **ANDREA BRICCONI**

业务开发副总裁

[andrea.bricconi@camgandevices.com](mailto:andrea.bricconi@camgandevices.com)

[www.camgandevices.com](http://www.camgandevices.com)

德国慕尼黑

[info@camgandevices.com](mailto:info@camgandevices.com)

[sales@camgandevices.com](mailto:sales@camgandevices.com)

[techsupport@camgandevices.com](mailto:techsupport@camgandevices.com)

### 免责声明

Cambridge GaN Devices Limited 提供的信息准确无误。Cambridge GaN Devices Limited 不对任何接收方或第三方因使用或执行本指南中给出的数据产生的损害承担赔偿责任，包括（但不限于）人身伤害、财产损失、利润损失、商业机会损失、使用损失、业务中断或以其他方式产生的间接、特殊、偶然或后果性损害。

Cambridge GaN Devices Limited 提供技术或其他服务，不对接收方或第三方承担任何义务或责任。

### Cambridge GaN Devices Limited

Deanland House

160 Cowley Road

Cambridge

CB4 0DL

