

用 LM2733XMF 设计用于雪崩光电二极管 (APD) 的高升压比偏置电源

陈鉴宇

South China Application Team

ABSTRACT

在 10 公里以上光纤网络中，雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 作为最常用的高灵敏度光电信号转换器件被广泛用于长距离光模块的设计中。APD 工作时通常需要 30-70V 的反向偏置电压。在输入电压只有 3.3V 且空间有限的光模块中，该偏置电源的设计是主要难点之一。本文根据市场容量大的无源光网络局端设备的要求，分析比较各种高升压比电路方案，使用 TI 小体积升压变换器 LM2733XMF 设计出了满足要求的电源。该方案已经广泛运用在光模块设计中。

目录

1	引言	2
2	高升压比电路的难点	2
3	倍压电路	3
	3.1 抽头电感升压电路	3
	3.2 电荷泵倍压电路	4
4	APD 升压偏置电路的设计	5
	4.1 高升压比电路	5
	4.2 输出调压方案	7
5	结论	8
6	参考资料	8

Figures

Figure 1.	升压电路	2
Figure 2.	抽头电感升压电路	3
Figure 3.	电荷泵倍压电路	4
Figure 4.	倍压升压电路	5
Figure 5.	LM2733XMF 倍压升压电路图	5
Figure 6.	开关节点 SW 的波形	7
Figure 7.	输出调压电路	7

Tables

Table 1.	物料清单	6
----------	------------	---

1 引言

光模块是光纤网络必备的接入器件，它的额定输入电源通常为 3.3V。APD 作为高灵敏度的光电转换器件，多用于 10 公里以上的远距离传输。APD 通常需要高达 30 至 70V 的反向偏置电压，该偏置电压值还要求随着 APD 偏置电流的变化而调整，偏置电流在 2mA 以内。因此，要使用 APD 就需要设计一个高升压比的电路，同时在体积、纹波、调压方法和成本等方面也存在挑战。

目前，无源光网络局端设备(Optical Line Terminal, OLT)对具有 2.5Gbps 通信速率的光模块有每年千万支的市场需求量。本文根据 OLT 对 2.5Gbps 光模块的需求，分析比较了两种高升压比电路方案，使用 TI 升压变换器 LM2733XMF 设计出了输出电压可调的高压偏置电源。该方案已广泛运用于 OLT 的光模块设计中。

2 高升压比电路的难点

Figure 1^[1]所示为常见的升压电源电路。

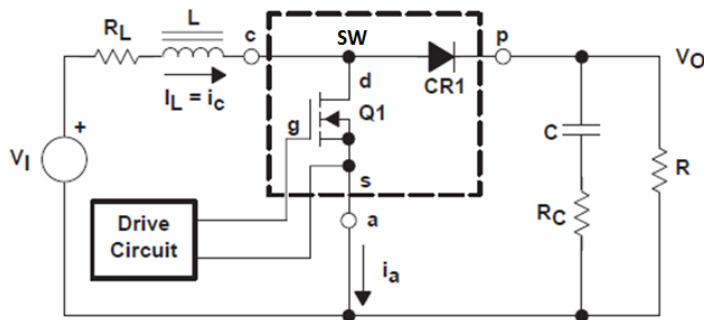


Figure 1. 升压电路

设计电感工作在连续模式下，如果忽略电感、开关管和二极管的压降，3.3V 输入 70V 输出的升压电源占空比 D 可由式 1 计算得到。

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{70V - 3.3V}{70V} \approx 95.3\% \quad (1)$$

这需要变换器芯片的占空比能达到 95.3% 以上。同时，在连续电流模式下，控制环路会出现一个右半平面零点(Right Half Plane Zero)，它会增加幅度增益却减少了相位余量。占空比越大，右半平面零点的频率点越低。当占空比达到 95.3% 以上的时候，右半平面零点频率已经很低，如果进入环路带宽内，将造成环路不稳定。发生这种情况时，输出电压无论如何也升不到目标值。只有进一步减小带宽来解决这个问题，但这样会造成动态响应变差。从物理方面分析，当占空比很大的时候，开关管关断时间很短，导致电感内储存的能量无法在这么短的时间内完全传输到负载，所以输出电压会下降。可根据式 2 计算出要维持电感工作在连续模式的最小电感量， $D=95.3\%$ 。

$$L = \frac{D^2 \cdot V_i^2}{2 \cdot I_o \cdot f \cdot (V_o - V_i)} \quad (2)$$

当开关频率 f 为 1.6MHz 时，计算出当电感量 L 大于 23.2 μH ，电感才能在输出电流 I_o 为 2mA 的情况下工作在连续模式。通常 23 μH 以上的电感体积是比较大的。

进一步减小电感量至每个开关周期内流过电感的电流能下降到零，这样电感就工作在断续模式。在同样的电压、功率和开关频率情况下，断续模式比连续模式的占空比更小，而且和负载电流大小有关。断续模式的占空比计算如式 3。

$$D = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot V_o}{V_I^2} - \frac{2}{V_I}\right) \cdot I_o \cdot L \cdot f} \quad (3)$$

由上式可以得出电感量 L 越小，占空比 D 越小。此外，断续模式下的电感电流峰值 I_{PK} 可由式 4 计算得出。

$$I_{PK} = \sqrt{\frac{2 \cdot (V_o - V_I) \cdot I_o}{L \cdot f}} \quad (4)$$

由式 4 可以看出电感量 L 越小，峰值电流 I_{PK} 越大，这就需要采用电流更大的芯片和电感。同时，更大的峰值电流也意味着更大的输出电压纹波。因此，设计断续模式电路时，需要权衡占空比、峰值电流和纹波，使用合适的芯片和电感进行设计。

从芯片电压方面考虑，无论连续模式和断续模式，都需要电源芯片的输入工作电压能低至 3.3V，输出电压要高于 70V 才能满足要求。目前 3.3V 输入升压变换器芯片的输出电压范围通常在 40V 以内。为了实现 70V 的输出，需要使用倍压电路。

3 倍压电路

倍压电路是利用变压器或者电荷泵将 Figure 1 中的输出电压按整数倍升压。它可以在目前的升压芯片上实现更高的输出电压。在连续电流模式下，倍压电路也可以显著降低占空比，减少所需的电感量，使芯片和电感的选择范围更大。

3.1 抽头电感升压电路

如 Figure 2 所示，在电感上增加一个中间抽头，使电感线圈能像变压器一样具有匝数比 $N=N_P:N_S$ ，这就是抽头电感升压电路。

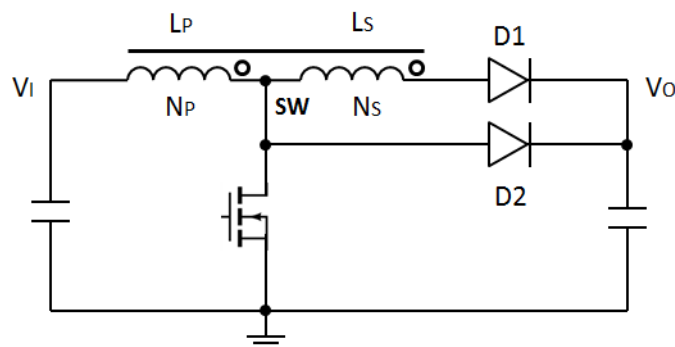


Figure 2. 抽头电感升压电路

抽头电感的耦合度比变压器要好很多。通过计算连续模式下电感 L_P 电流纹波 ΔI [2]，可得等式 5。

$$\Delta I = \frac{V_I}{L_p} \cdot t_{on} = \frac{V_O - V_I}{L_p} \cdot \frac{N_p}{N_p + N_s} \cdot t_{off} \quad (5)$$

进一步计算得出占空比 D 和电流纹波 ΔI 。

$$D = \frac{1}{1 + \frac{L_p + L_s}{L_p} \cdot \frac{V_I}{V_O - V_I}} = \frac{V_O - V_I}{V_O + \frac{1}{N} \cdot V_I} \quad (6)$$

$$\Delta I = \frac{V_I}{L_p} \cdot \frac{1}{f_{sw}} \cdot D = \frac{V_I}{L_p} \cdot \frac{V_O - V_I}{V_O + \frac{1}{N} \cdot V_I} \cdot \frac{1}{f_{sw}} \quad (7)$$

如果将抽头电感换成变压器，则 **Figure 2** 就变成了反激电源。根据式 **6** 和 **7** 可知，在同样匝比情况下，抽头电感升压电路比反激电源的占空比更小，电流纹波也更小。这对要求高升压比低纹波的 APD 偏置电源设计很有帮助。

需要注意的是，为了提高升压比，抽头电感的次级电感量 L_s 比较大，这会限制电流的变化率 di/dt ，导致在 **SW** 处出现瞬间冲击电压。因此，需要增加一个二极管 **D2** 来钳位冲击电压。这个冲击只会发生在开关瞬间，所以 **D2** 可以选用小功率的二极管。如果将 **D2** 连接到比 V_O 低的电压（但要大于 **SW** 处电压的理想峰值），就可以将冲击电压钳位到更低的安全电压，这样就可以选择低电压的芯片进行设计。在 **Figure 2** 的电路方案中，抽头电感通常需要专门的定制。

3.2 电荷泵倍压电路

电荷泵是利用电容的储能和二极管的单向导通特性将交流电压倍增至更高电压的电路。如 **Figure 3** 所示，通过不同级数的电容和二极管组合可以将输入电压升高到电压峰值 U_I 的 2 倍、3 倍乃至更高倍数。这种电容型倍压电路的优势在于，无论最终升高到 U_I 的几倍，输入电源上都不会出现过高的冲击电压，这样就能采用低压芯片设计出更高输出电压的电源。

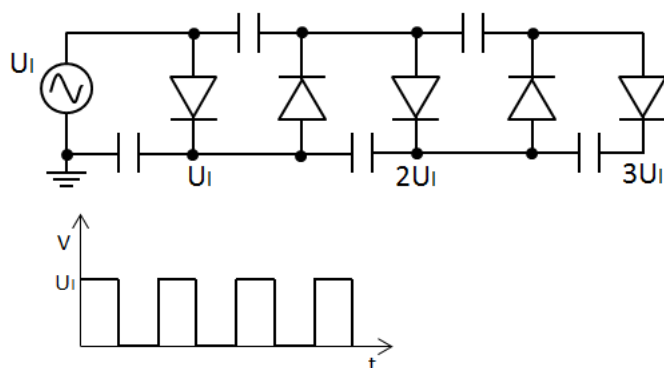


Figure 3. 电荷泵倍压电路

如果设计出一个交流源就能连接到电荷泵进行倍压。**Figure 1** 的电路中，开关节点 **SW** 就是一个交流源，所以可在此基础上增加一级倍压电路实现 $2V_O$ 的电压输出。完整电路如 **Figure 4**，其中的二极管和电容是很普遍的器件，容易采购。

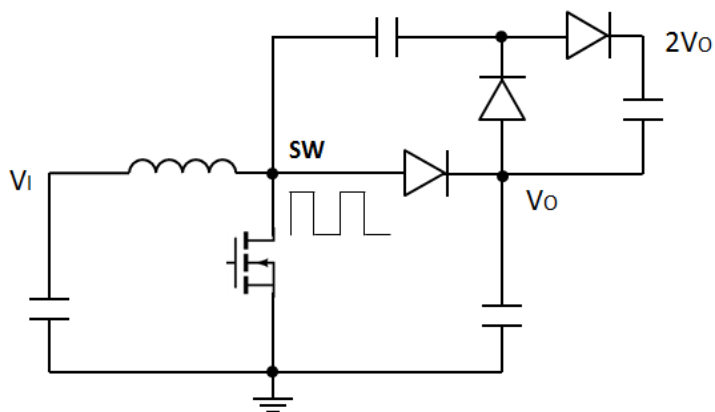


Figure 4. 倍压升压电路

电荷泵只用电容作为储能和滤波器件，所以它适合小功率的电源设计，其输出纹波比前文使用电感的升压方案大。

4 APD 升压偏置电路的设计

4.1 高升压比电路

APD 升压偏置电路的功率不大。通过之前的方案比较，使用 Figure 4 的电路能方便的实现 3.3V 输入、70V/2mA 输出的升压电源设计，且能满足小体积、低纹波和低成本的要求。升压变换器芯片选择输出可达 40V 的 LM2733XMF，再通过一级倍压电路就能实现 70V 的输出。

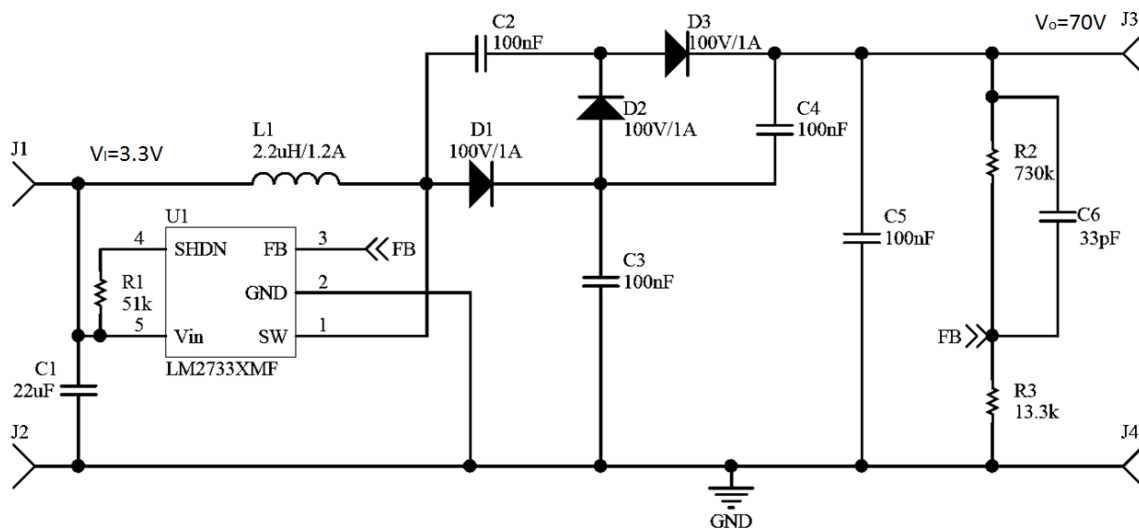


Figure 5. LM2733XMF 倍压升压电路图

Figure 5 为电路原理图。2.2uH 的电感使 LM2733XMF 工作在断续模式，这样就减少了占空比，满足了 LM2733XMF 最大占空比为 83% 的限制。倍压电路的二极管和电容都是很常用的器件。倍压后的 70V 输出电压经过 R2、R3 电阻分压直接反馈给 LM2733XMF 的 FB 引脚。C5 是输出滤波电容。

Table 1. 物料清单

Designator	Description	Package	Part Number	Manufacturer
C1	CAP, CERM, 22uF, 25V, +/-10%, X5R, 0805	0805	CL21A226MAQNNNE	SAMSUNG
C2,C3,C4,C5	CAP, CERM, 100nF, 450V, +/-10%, X7R, 1206	1206	CGA5L4X7T2W104K160AE	TDK
C6	CAP, CERM, 33pF, 50V, +/-5%, C0G, 0603	0603	STD	TDK
D1,D2,D3	Diode, Schottky, 100V, 1A, 1206	1206	SD1206S100S1R0	AVX
L1	Inductor, Ferrite, 2.2uH, 1.2A, 0.115ohm, 1210	1210	NLCV32T-2R2M-PFR	TDK
R1	RES, 51kohm, 1%, 0.1W, 0603	0603	STD	TDK
R2	RES, 730kohm, 1%, 0.1W, 0603	0603	STD	TDK
R3	RES, 13.3kohm, 1%, 0.1W, 0603	0603	STD	TDK
U1	IC, 1.6-MHz Boost Converters With 40-V Internal FET Switch in SOT-23	SOT23	LM2733XMF/NOPB	Texas Instruments

Figure 6 是 LM2733XMF 倍压升压电路工作在 3.3V 输入、70V/2mA 输出的工作波形。CH4 是电感电流波形。电流探头通过转换器连接到示波器，转换率是 5A/V。可见电感电流每个周期都下降到零，电源工作在断续模式。电感电流超过零的上升沿波形部分为开关闭合状态，可见占空比小于 50%，没有出现占空比过大的情况。

CH1 是 SW 波形，其最高电压为 37.6V，约等于 70V 输出的一半，没有超过 LM2733XMF 的 40V 工作范围。

CH3 是 70V 输出电压，CH2 是输出纹波。在输出电容 C5 为 100nF 的情况下，纹波在 5mV 以下，能够满足 2.5Gbps OLT 光模块的要求。增加 C5 的电容量可以进一步降低输出纹波。如果使用 RC 滤波器，效果会更好。由于最大输出电流只有 2mA，RC 滤波器中电阻上的压降也会非常小。LM2733XMF 的开关频率高达 1.6MHz，这对减小纹波很有帮助。

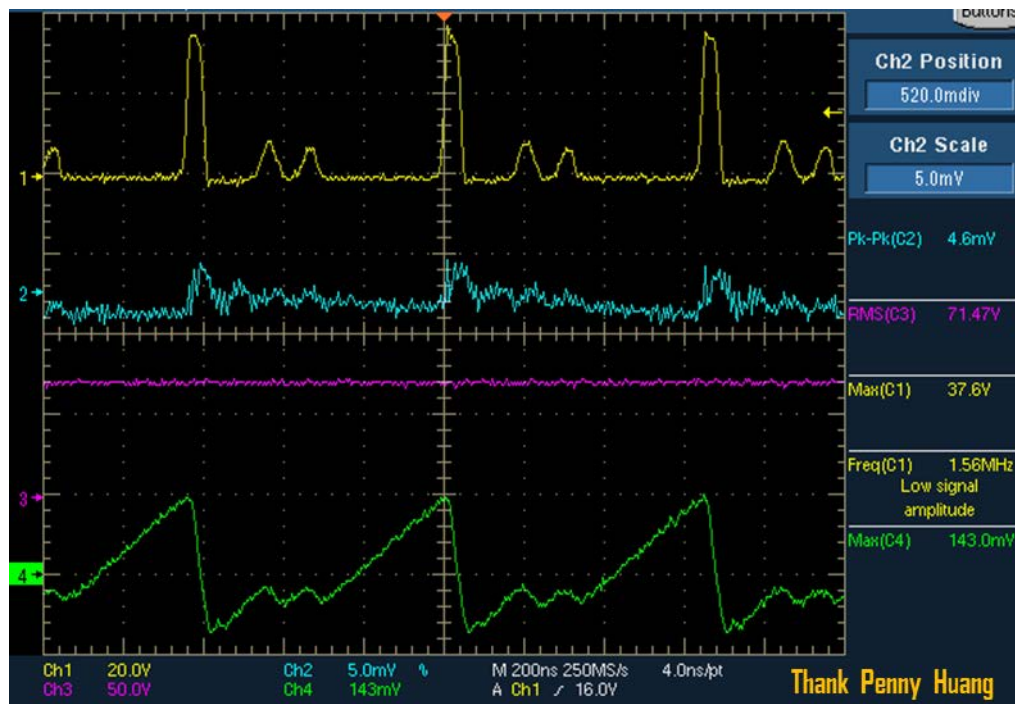


Figure 6. 开关节点 SW 的波形

4.2 输出调压方案

Figure 7 是利用 DAC 在 LM2733XMF 的 FB 引脚上进行输出调压的方案。

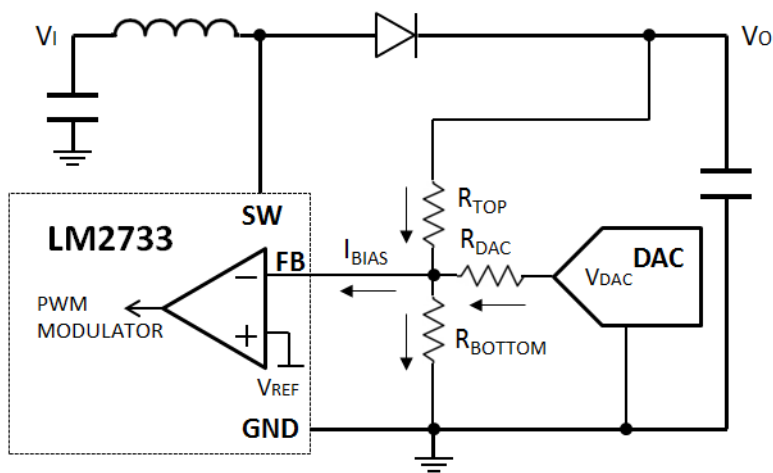


Figure 7. 输出调压电路

根据电流守恒原理，FB 这点的总电流为零，我们可以得到式 8。由于运放的输入偏置电流 I_{BIAS} 只有 60nA，故将其忽略。

$$I_{TOP} + I_{DAC} - I_{BOTTOM} - I_{BIAS} = 0 \quad (8)$$

在稳定状态下，FB 点的电压等于参考电压 V_{REF} 。 I_{TOP} 、 I_{DAC} 和 I_{BOTTOM} 都可以由电阻值和电压值根据欧姆定律计算得出。整理后可以等到式 9。

$$V_O = \left(\frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} + \frac{R_{TOP}}{R_{DAC}} + 1 \right) \cdot V_{REF} - \frac{R_{TOP}}{R_{DAC}} \cdot V_{DAC} \quad (9)$$

由式 9 可知，其它值都是常数，改变 DAC 的输出电压 V_{DAC} 就可以改变电源的输出 V_O 。应该注意的是，初始状态下 DAC 尚未输出某个电压值的时候， R_{DAC} 和 DAC 内部的电路会改变下分压电阻值，为了将电压范围严格设置在 30-70V 范围内，需要适当减小 R_{TOP} 的电阻值。

5 结论

本文讨论了高升压比电路的设计要点和难点，比较了抽头电感升压电路和电荷泵升压电路两种方案的特点。根据 2.5Gbps OLT 光模块对 APD 偏置电路的要求，采用 LM2733XMF 变换器芯片，按照电荷泵升压电路方案，设计出了小体积、低纹波和低成本的升压电路，并且介绍了输出电压调压方案。LM2733XMF 变换器芯片以及该电路方案已经广泛运用于光模块的设计中。

6 参考资料

1. Texas Instruments, "Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies," SLVA061 application note, Mar. 1999.
2. N. Vazquez, L. Estrada, C. Hernandez and E. Rodriguez, "The Tapped-Inductor Boost Converter," 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 538–543, Jun. 2007.
3. Texas Instruments, "LM2733 0.6 and 1.6-MHz Boost Converters with 40-V Internal FET Switch in SOT-23," SNVS209F datasheet, Nov. 2002[Revised Dec. 2014].

IMPORTANT NOTICE FOR TI DESIGN INFORMATION AND RESOURCES

Texas Instruments Incorporated ("TI") technical, application or other design advice, services or information, including, but not limited to, reference designs and materials relating to evaluation modules, (collectively, "TI Resources") are intended to assist designers who are developing applications that incorporate TI products; by downloading, accessing or using any particular TI Resource in any way, you (individually or, if you are acting on behalf of a company, your company) agree to use it solely for this purpose and subject to the terms of this Notice.

TI's provision of TI Resources does not expand or otherwise alter TI's applicable published warranties or warranty disclaimers for TI products, and no additional obligations or liabilities arise from TI providing such TI Resources. TI reserves the right to make corrections, enhancements, improvements and other changes to its TI Resources.

You understand and agree that you remain responsible for using your independent analysis, evaluation and judgment in designing your applications and that you have full and exclusive responsibility to assure the safety of your applications and compliance of your applications (and of all TI products used in or for your applications) with all applicable regulations, laws and other applicable requirements. You represent that, with respect to your applications, you have all the necessary expertise to create and implement safeguards that (1) anticipate dangerous consequences of failures, (2) monitor failures and their consequences, and (3) lessen the likelihood of failures that might cause harm and take appropriate actions. You agree that prior to using or distributing any applications that include TI products, you will thoroughly test such applications and the functionality of such TI products as used in such applications. TI has not conducted any testing other than that specifically described in the published documentation for a particular TI Resource.

You are authorized to use, copy and modify any individual TI Resource only in connection with the development of applications that include the TI product(s) identified in such TI Resource. NO OTHER LICENSE, EXPRESS OR IMPLIED, BY ESTOPPEL OR OTHERWISE TO ANY OTHER TI INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT, AND NO LICENSE TO ANY TECHNOLOGY OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI OR ANY THIRD PARTY IS GRANTED HEREIN, including but not limited to any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information regarding or referencing third-party products or services does not constitute a license to use such products or services, or a warranty or endorsement thereof. Use of TI Resources may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

TI RESOURCES ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES OR REPRESENTATIONS, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING TI RESOURCES OR USE THEREOF, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ACCURACY OR COMPLETENESS, TITLE, ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY AND ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

TI SHALL NOT BE LIABLE FOR AND SHALL NOT DEFEND OR INDEMNIFY YOU AGAINST ANY CLAIM, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY INFRINGEMENT CLAIM THAT RELATES TO OR IS BASED ON ANY COMBINATION OF PRODUCTS EVEN IF DESCRIBED IN TI RESOURCES OR OTHERWISE. IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY ACTUAL, DIRECT, SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF TI RESOURCES OR USE THEREOF, AND REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

You agree to fully indemnify TI and its representatives against any damages, costs, losses, and/or liabilities arising out of your non-compliance with the terms and provisions of this Notice.

This Notice applies to TI Resources. Additional terms apply to the use and purchase of certain types of materials, TI products and services. These include; without limitation, TI's standard terms for semiconductor products (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>), [evaluation modules](#), and [samples](http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm) (<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>).

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2018, Texas Instruments Incorporated