面向激光雷达的eGaN® FET – 发挥激光驱动器EPC9126的最大功效

宜普电源转换公司应用工程总监John S.Glaser

激光雷达（lidar）是一种雷达，其电磁辐射处于光波段范围内[1、2]。在过去几年间，业界有一种逐渐流行的激光雷达 -飞行时间（TOF）距离/景深测量。如果激光被用作光源，即使在长距离内，也可以测出被测物体/小光点的距离。当与可控光学系统结合使用，可以在三维空间扫描到光点的测距和测绘物体。

EPC开发了激光驱动器EPC9126和EPC9126HC开发板，展示出面向激光雷达应用的氮化镓场效应晶体管（eGaN FET）的性能，而且使得最先进的激光雷达技术得以继续发展[3、4]。EPC9126和EPC9126HC均备有速查指南（QSG），为用户提供基本信息、原理图和材料清单（BOM）等资料，使得用户可以即时使用。此外，我们也为用户提供驱动器的各种布局的文档。

然而，尽管激光驱动器的基本原理像是非常简单，其高速、电压和电流会增加寄生元件的影响，这是许多工程师通常会忽略的。本应用笔记旨在回答用户的常见问题，以及更深入探讨激光驱动器的设计，从而帮助用户发挥驱动器的最高性能。

写这篇应用笔记的目的，是希望作为速查指南的辅助工具。用户在学习及使用EPC9126和EPC9126HC开发板时，请同时参考此应用笔记和速查指南，相辅相成。

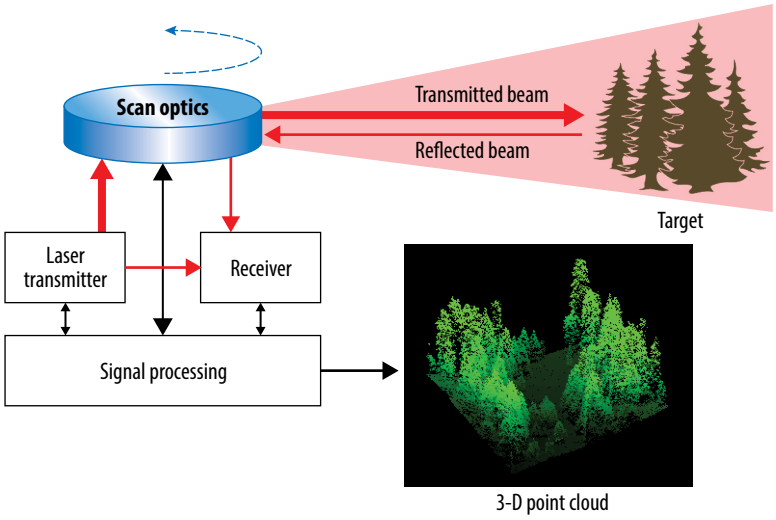
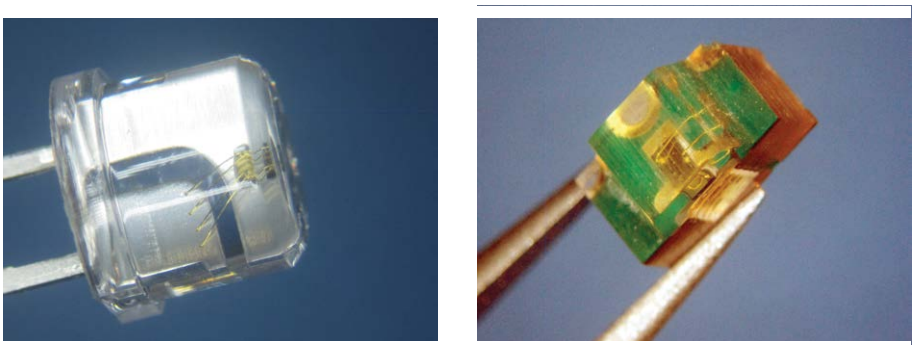


图1：激光雷达的基本系统.。

激光和脉冲的要求

TOF激光雷达通常使用近红外线（NIR）半导体激光二极管，激光是侧面发射外延激光或是垂直腔面发射激光器（VCSEL）。图2展示出典型的激光二极管 [5、6]。激光二极管的电气特性是用作为整流器。当正向偏压超过若干的阈值电流时，它发射出激光辐射，其输出光功率与正向电流大约成正比。因此，如果用电流脉冲驱动它，可实现激光脉冲[7]。激光光脉冲有两个主要参数 - 脉宽和能量，它们分别对距离分辨率和测距范围的影响很大。



SPL PL90_3 **TPGAD1S09H**

图2：用于TOF激光雷达的典型激光二极管。

光信号的脉宽对激光雷达系统的距离分辨率影响很大[8、9]，其原因如图1所示。我们看到在上面所展示出的情况，激光雷达发送窄脉冲。由于光脉冲必须发送到目标、被反射及返回，如果目标的距离是d值，脉冲传输和接收的相距时间t_d就可由以下的 (1) 方程式计算出:

$$t_d = 2d/c \qquad (1)$$

其中，c是空中的光速，大约是30 厘米/纳秒（英制大约是1 英尺/纳秒）。从测量所得的t_d可以计算出距离。现在，我们假设发送更长时间的脉冲，如图中下面的情况所展示。我们看到如果脉冲长度足够，反射脉冲会开始重叠而更难区分场境中的物体。

实际上，要找出理想的脉冲长度，可考虑利用1 纳秒的电流脉宽来驱动激光二极管，这相对是30 厘米的光脉冲长度。当目标物体接近15厘米的距离时，接收到的脉冲开始重叠，并且变得难以分辨。虽然各种信号处理技术都可以提高给定的脉宽分辨率，较短的脉宽很明显具有更高的固有精准度，而且该脉宽是数纳秒或更短，是人本尺度的理想分辨率。

脉冲能量决定激光雷达的范围。由于设计要求更好的分辨率，需要采用更窄的脉冲，从而增加二极管的电流并保持足够的脉冲能量。典型脉冲电流范围从数安培到数百安培不等。给定多个激光二极管的额定脉冲电流在数十安培的范围内。如果根据典型数据表所载的测试条件，例如脉冲重复频率 (PRF) 是1 kHz、脉宽t_w是100 纳秒、峰值电流I_{DLpk}为30 A、工作温度T_{OP}是23-25°C，三结边缘发射激光器的输入峰值功率可高达300 W。为了防止激光芯片过热，平均测试占空比通常小于0.1%。这些激光二极管有可能在较高电流和较短脉宽下工作，以及可实现更高的光峰值功率。

总括而言，对激光雷达系统中商用并已有供货的激光二极管的典型要求，驱动业界实现从数安培到数百安培的理想峰值脉冲电流范围，以及从1至10 纳秒的脉宽。下章节将解构如何实现这些极端的脉冲。

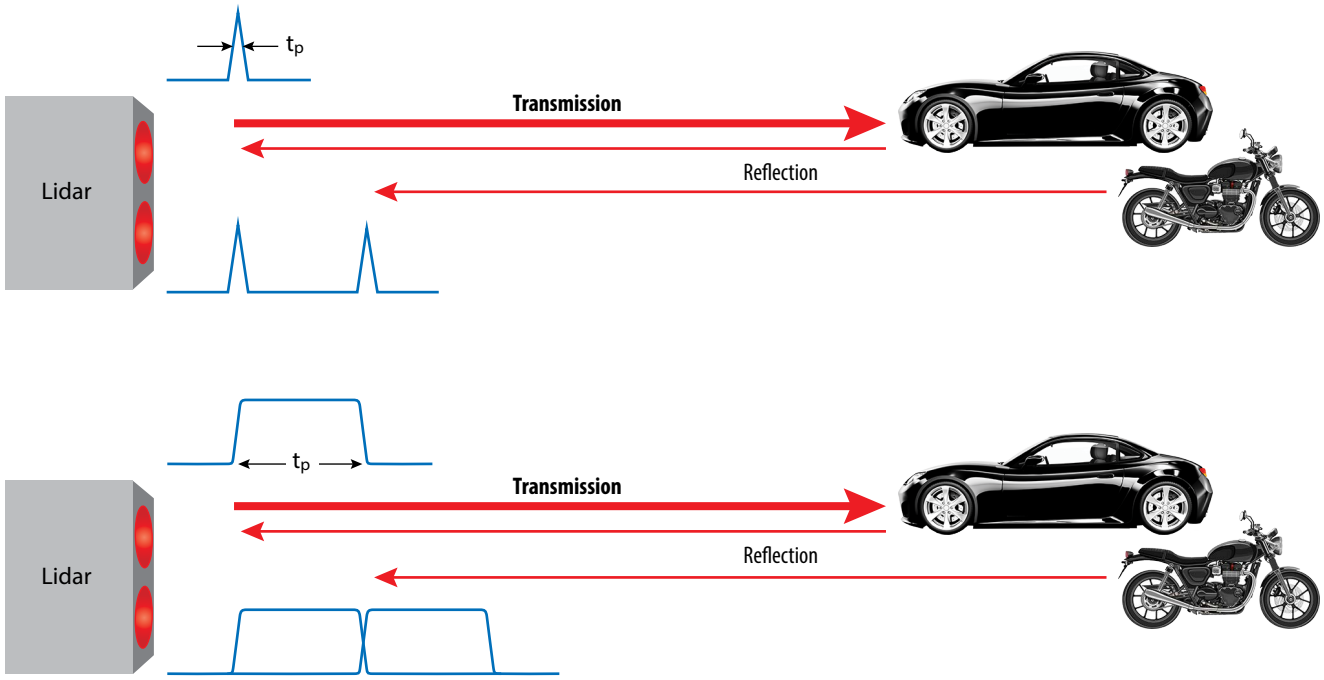


图3: 激光雷达脉宽对分辨率的影响。上图: 窄脉冲可以很容易区分反射数据。下图: 较宽的脉冲可以重叠并使得它们难以区分场境中的物体，并且降低距离分辨率。

激光驱动器

面向激光雷达应用的典型脉冲雷射驱动器使用与激光和电源串联的半导体开关。杂散电感和半导体电源开关的速度限制了其性能。在过去的十年里，极具成本效益的氮化镓（GaN）功率场效应晶体管已经商用化及推出市场，其电感低很多，而且与等效硅MOSFET相比，其开关品质因数可以好10倍[10]。图4展示出EPC2016C氮化镓场效应晶体管是一个100 V器件，可产生75 A脉冲[11]。

与更陈旧的硅MOSFET器件相比，氮化镓场效应晶体管（eGaN FET）在性能方面实现了质的飞跃。它在给定的峰值电流能力下，开关速度快很多，从而可以实现在激光负载下[13、14]，大于100 A的电流、小于2 纳秒的脉宽，尽管二者不能同时兼得（目前未能同时实现得到！）。

有多种不同的激光驱动器拓扑结构，但适用于高功率的，有两种主要拓扑：前沿控制共振激光驱动器和限流型双缘控制驱动器。由于共振激光驱动器最常见于需要高速开关的应用，因此以下的讨论内容主要与这种驱动器相关。

EPC9126和EPC9126HC 激光二极管驱动器

EPC9126激光驱动器是一个多功能平台，可测试eGaN FET和激光二极管的性能。EPC9126和EPC9126HC的PCB相同。两个驱动器的组件有一些差异。已经发货的EPC9126具有较低的峰值电流和较短的脉冲，而EPC9126HC具有较高的输出电流和较长时间的脉冲。表1总结了其主要差异。其实，除了这些差异外，两个电路板是相同的，而且除非标明，本笔记中均适用于这两个电路板，并统称为EPC9126xx系列。

发货付运时，这两个电路板被配置为共振激光驱动器。关于这些驱动器的基本操作以及其设计公式，我们将在以下讨论。

共振电容放电激光驱动器的设计

图5是共振电容放电激光驱动器的简化原理图。图6是主要的波形。

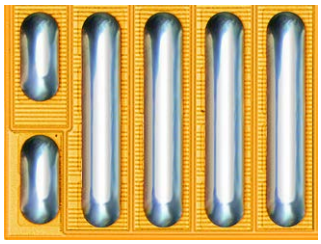


图4: EPC2016C 100 V、75 A、16 mΩ的尺寸为2.1 毫米x1.6 毫米。通过了车规级AECQ101认证的EPC2212的外形尺寸和额定值相约[12]。

元件	EPC9126	EPC9126HC
FET	EPC2016C / EPC2212	EPC2001C
FET脉冲电流额定值	75 A	150 A
电流分流器	102 mΩ	94 mΩ
共振电容	1.1 nF	2.8 nF

表1: EPC9126和EPC9126HC的差异。

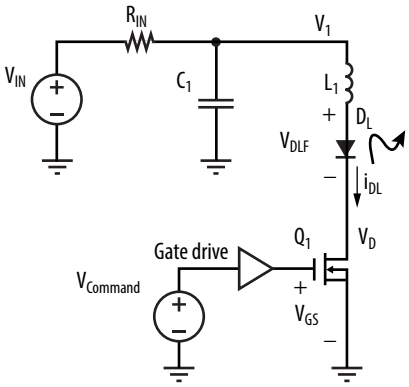


图5: 电容放电共振驱动器。

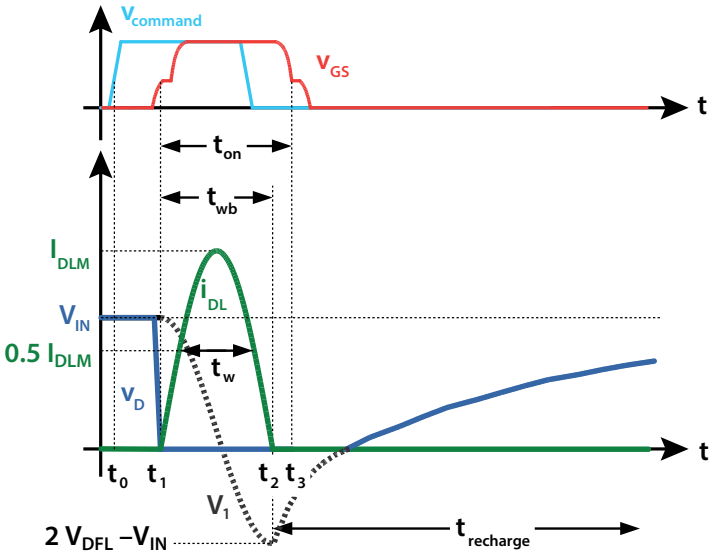


图6: 图5的电容放电共振驱动器的主要波形图。

假设Q_1是一个理想开关，D_L是一个具有固定正向压降V_{DLF}的理想二极管。该驱动器的工作原理如下：Q_1在关闭状态开启，所以i_{DL} = 0。电容器电压v_1 = V_{IN}，通过R_1充电。当t是t_0时，$V_{command}$触发栅极驱动，从而在t = t_1时将Q_1开启，并通过激光D_L和电感器L_1放电为C_1。C_1和L_1形成一个共振网络，因此i_{DL}和v_{C1}采用正弦波的振铃。由于激光二极管正向下降，有效初始电容电压为$V_{C1,0}$ = V_{IN} – V_{DLF}。在t = t_2时，i_{DL}返回零值，而且v_{C1} = 2 V_{DLF} – V_{IN}。这时，D_L防止电流逆向，而C_1通过R_1再充电。在t = t_3时，V_1到零之前，开关Q_1将关断。

电容器充电时间的常数τ_{chrg}和共振周期t_{res}为：

$$\tau_{chrg} = R_1 C_1 \quad (2)$$

$$t_{res} = 2\pi\sqrt{(L_1 C_1)} = 2t_{wb} \quad (3)$$

τ_{chrg}>>t_{res}，因此R_1对L_1–C_1共振的影响很小。共振特性阻抗R_0和半高宽（FWHM）t_w为：

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (4)$$

$$t_w = t_{res}\frac{\pi - 2sin^{-1}\frac{1}{2}}{2\pi} = \frac{t_{res}}{3} \quad (5)$$

这种激光驱动器拓扑结构的优点是：

- 利用杂散电感
- 稳定的脉冲形状
- 通过V_{IN}值取得脉冲能量
- 开关是接地参考，是一个简单的驱动器
- 只有栅极开启需要精确控制（单边控制）
- 激光电流脉宽可小于栅极驱动的最小脉宽

杂散电感的影响

我们可以使用以下（6）方程式计算出激光二极管的峰值电流I_{DLpk}：

$$I_{DLpk} = \frac{V_{IN} - V_{DLF}}{R_0} \quad (6)$$

电感对设计有很大的影响。从（3）、（4）、（5）和（6）方程式开始，我们求解V_{IN}以找到：

$$V_{IN} = \frac{2\pi L_1}{3t_w} I_{DLpk} + V_{DLF} \quad (7)$$

方程式7显示图（7） 计算出的激光器上有9 V正向二极管压降的电压V_{IN}与30 A的L_1之相比。我们可以看到，在给定的激光和脉冲形状的条件下，所需V_{IN}将随L_1呈线性增加。

驱动器的开关属性

上述分析假设使用理想的开关，但实际的半导体开关具有不是零的开关时间和饱和电流限制。此外，开关及其封装的电感可以很大，这不仅增加了给定脉冲形状所需的电压，而且还减慢了开关的开启速度。

从前首选的开关技术是采用硅功率MOSFET。然而，随着激光雷达系统设计人员要求更高的器件性能，硅功率MOSFET反而成为了主要的限制因素。原因有两个：首先，由于需要大尺寸的芯片来实现电流和电压方面的要求，结果是出现更大的栅极电荷。这样，大大降低了MOSFET的开关速度[15]。第二，大型的MOSFET器件是一种垂直器件，由于芯片的两侧都有连接，因此必需使用外部封装，使得在电源回路和栅极驱动回路中都大大增加了电感[16]。前者导致更高的电压要求和更大尺寸的芯片，而后者则进一步减慢了器件的开启速度。

在过去的几年间，最新的氮化镓功率场效应晶体管（GaN FET）已经推出市场。与硅MOSFET器件相比，GaN FET在激光雷达应用中有多个卓越的优势。第一，与具有相约的额定电流[17]的MOSFET器件相比，这些氮化镓器件的输入电容C_{ISS}低出10倍，从而使得GaN FET的开启速度更快。第二，GaN FET是一种横向器件，使用晶圆级芯片规模封装（WLCSP）。WLCSP具有极低的电感、卓越的散热性能、高可靠性和最小的附加成本。第三，GaN FET芯片的尺寸比具有相约电压和电流额定值的硅功率MOSFET小得多，从而进一步降低了电感，并使得相邻的激光器的相互间距可以很窄，对于多种应用来说，非常有利，例如适用于多通道的激光雷达应用[18]。

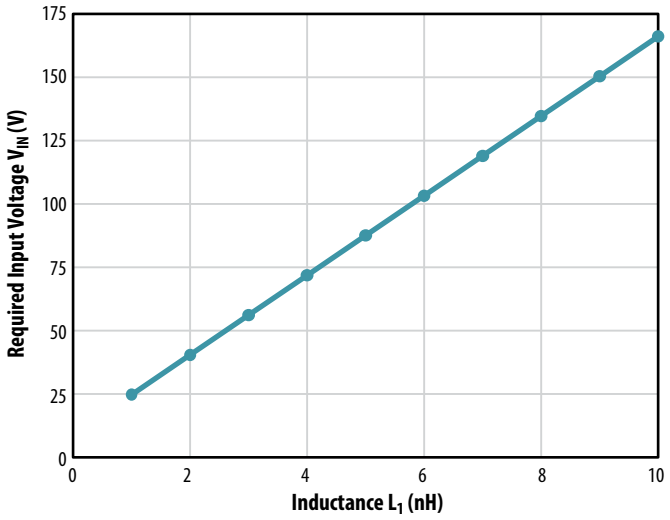


图7：I_{DLpk} = 0 A、t_w = 4 ns及V_{DLF} = 9 V的总线电压V_{IN}与电感L_1的关系。

基本设计过程

现在我们可以利用以上的讨论内容，设计一个共振激光雷达驱动器。系统设计通常需要激光脉冲符合一些规格，它们是：

- 脉冲峰值振幅I_{DLpk}
- 半高宽（FWHM）脉宽t_w
- 脉冲重复频率（PRF）
- 激光二极管压降V_{DLF}

当选择了所要求的脉冲，完成设计前需要确定电源回路电感（L_1），这在第3.4节讨论，但目前假设已经有其估计值。

为了确定共振电容器C_1值，我们使用（4）和（6）方程式来计算出：

$$C_1 = L_1 \left(\frac{I_{DLpk}}{V_{IN} - V_{DLF}} \right)^2 \quad (8)$$

充电电阻器R_1值由（2）方程式确定，便得出以下的（9）方程式：

$$R_1 = \frac{\tau_{chrg}}{C_1} \quad (9)$$

由于$\tau_{chrg} >> t_{res}$，我们只需要足够大的τ_{chrg}值。散热受限，逼使典型的脉冲占空比小于1%或1%，R_1值通常不需要精准地确定。如果需要在更高的占空比值下工作，我们将在第6.4节讨论。

最后，根据（7）方程式确定所需的总线电压V_{IN}，并与I_{DLpk}用来为FET Q_1选择适当的器件型号。从（7）、（8）和（9）方程式找出其它余下的数值，设计便完成了。

如何确定电源回路电感

我们看到所需的输入电压几乎随激光电感呈线性增加，以及输入电压决定了FET和电容器的额定值。此外，要知道激光驱动器的总线电压从哪里来--很大机会是从电路中的另一个升压转换器来。L_1减少越多，余下的设计就越简单，成本也会越低。参考文献[19]深入阐释PCB电感得以最小化的主要原理，也涵盖了多种可以降低布局的电感的有用技术。该文指出由于eGaN FET采用芯片级封装，FET、PCB、总线电容和电流感测分流器（如果需要）的电源回路电感值可以保持低于1 nH，并且可能接近500 pH以下。EPC9126xx的杂散电感接近1 nH，这取决于FET和负载的安装位置。该值高于可实现的最优值，因为折冲是不能增加设计的多功能性，尤其是可支持不同雷射封装的性能。

现在让我们看看其它的电感来源 - 主要的来源是激光。之前我们谈过，最好是通孔激光器可以提供大约5 nH的能量，而通常能量可以高很多。表面贴装激光器将产生接近1到3 nH的能量，这使得激光器是产生电感的主要来源。请注意，大部分激光电感来自激光封装，包括焊线。激光器制造商都知道激光封装电感可能影响性能，因此有望在这方面，于不久的将来，会进一步得到改善。

不幸的是，在设计开始时，很难知道准确的L_1值。这样，可能必需使用迭代算法。在初始设计，可以考虑给场效应晶体管额外的电压，这有助解决没有预计到的一些电感。

EPC9126xx硬件驱动器设计

图8展示出EPC9126xx激光驱动器的典型连接图。虽然连接和操作的详细描述可参看速查指南[20、21]，但这个图表很有用，让我们阐析如下。

所有信号I/O都使用SMA连接器。该设计包括电压测试点，包含嵌入式传输线探针，输出为J3、J7、J9和J10。电流测量分流器的输出在J6。设计的细节可以在[3、4]参考文献找到，包括Gerber布局文档和整个原理图。根据[19]参考文献，布局的设计旨在实现最小化的总电感。

图8是驱动器，以及放大了设计的主要部分。为了使电感L_1最小化，储能电容器C_1（PCB上的C_{11}、C_{12}、C_{13}、C_{14}、C_{15}）和电流测量分流器（R_{12}、R_{13}、R_{14}、R_{15}、R_{16}）都由五个尺寸为0402的表面安装封装并联连接。顶平面和地平面之间的间距为250 µm（10 mil），电感是最小化。为了将成本降到最低，不使用盲孔、埋孔或微通孔。

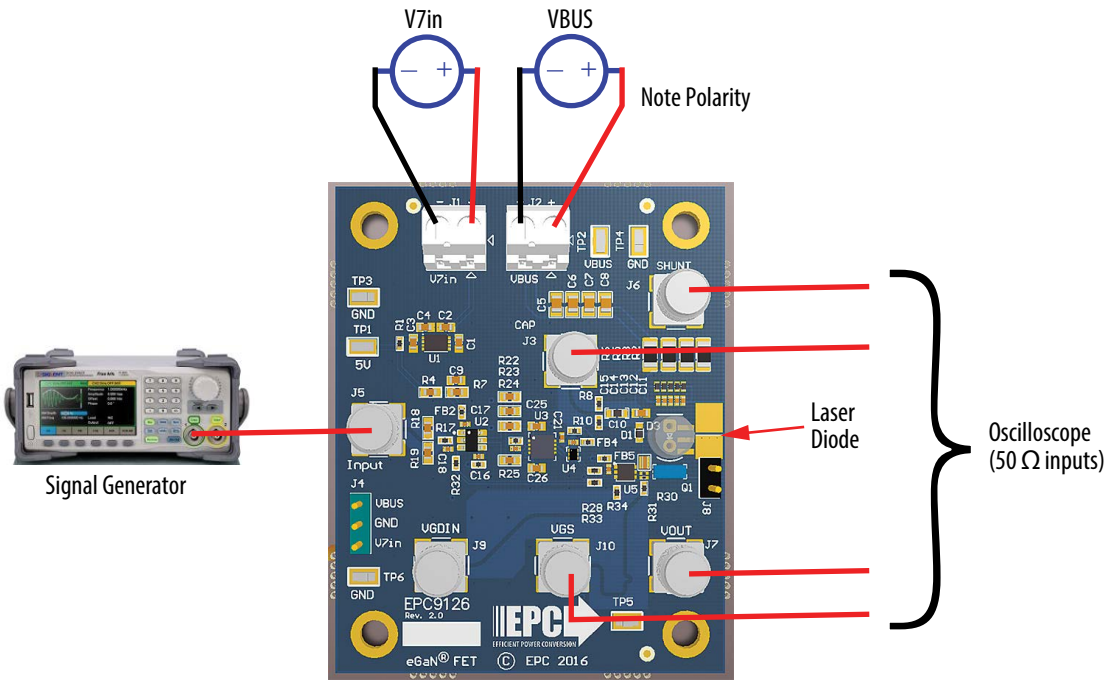


图8

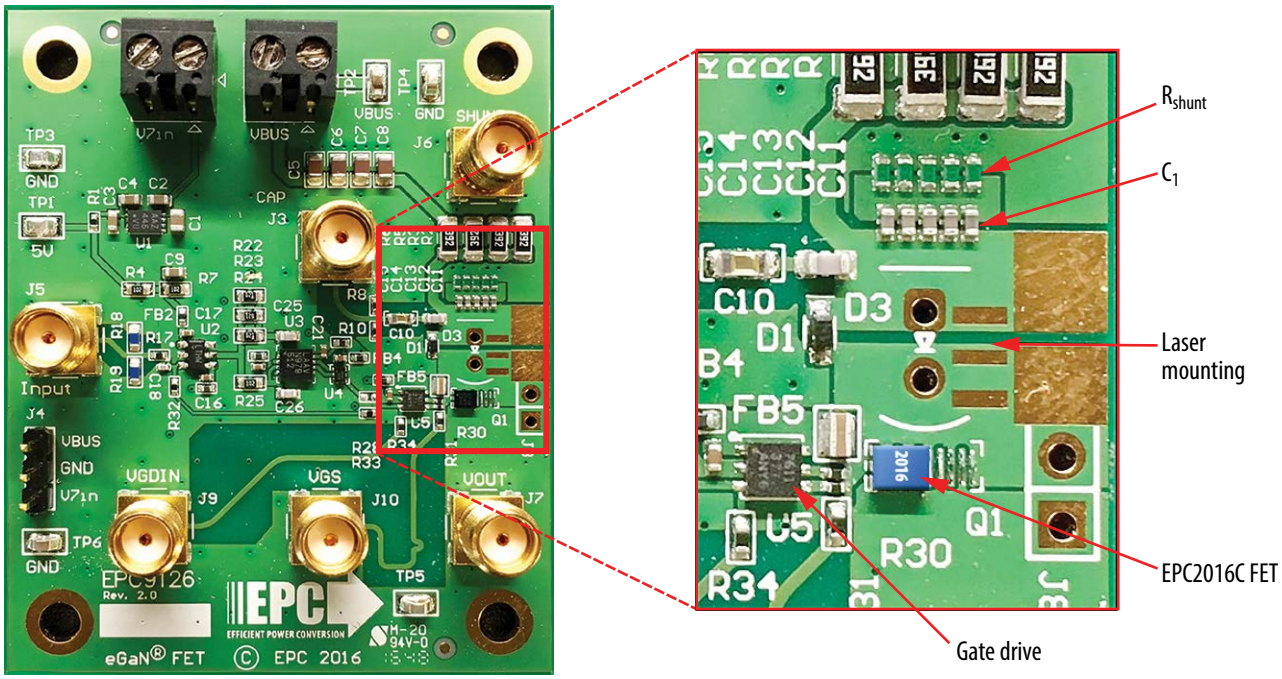


图9: 给实验验证用的、基于GaN FET的EPC9126激光驱动器。

电流测量有赖高性能的分流器，所以必须倒装分流电阻器，从而把串联电感从200 pH降到40 pH，及相应增加分流器的带宽达四倍[13]。我们会在本笔记的第9页的电流感应章节中详细讨论。

实验结果

EPC9126和EPC9126HC激光驱动器均通过Excelitas TPGAD1S09H表面贴装激光器的测试。在写此笔记时，Excelitas激光器是一种具有最低电感的表面贴装高功率脉冲激光器。设定输入电压均为75 V，我们得出以下谈论的EPC9126及EPC9126HC的电路测试结果。

EPC9126

电源回路电感L_1的估值为2.3 nH。如果设计具有35 A的I_{DLpk}和3.5 ns脉宽，则C_1 是1.2 nF和V_{IN}是60 V。电容器值C_1为1.1 nF，因为这是最接近标准元件可以实现到的数值。我们采用NP0/C0G陶瓷电容器，因为其电容稳定、损耗小。图10展示出V_{IN}为75 V的测试结果。当t_w = 3.4 ns时，峰值电流I_{DLpk}为35 A。这相当于激光器P_{DLpk} > 300 W的峰值功率输入。基于不同的电容值、电感估值误差、分流器的额外压降及激光二极管的压降并不是一个固定值，因此得出不同的结果和数值。

EPC9126HC

电源回路电感L_1的估值较低，为2.0 nH，因为EPC2001C器件的占板面积比EPC2016C大。如果设计具有70 A的I_{DLpk}和5 ns脉宽，则C_1是2.85 nF和V_{IN}是78 V。电容器值C_1是2.8 nF，因为这是最接近标准元件可以实现到的数值。我们采用NP0/C0G陶瓷电容器，因为其电容稳定、损耗小。图10展示出V_{IN} 为75 V的测试结果。当t_w = 5.0 ns时，峰值电流I_{DLpk}为63 A。这相当于激光器P_{DLpk} > 1300 W的峰值功率输入。基于不同的电容值、电感估值误差、分流器的额外压降及激光二极管的压降并不是一个固定值，因此得出不同的结果和计数值。

使用EPC9126的提示和技巧

EPC9126xx的灵活性很高，可利用它来实践新设计概念或认识具备快速开关和大电流脉冲优势的器件。本章节提供设计详情，以及建议采用不同方法来构建设计。图12是EPC9126x的方框图及为本章节提供有用的参考资料。

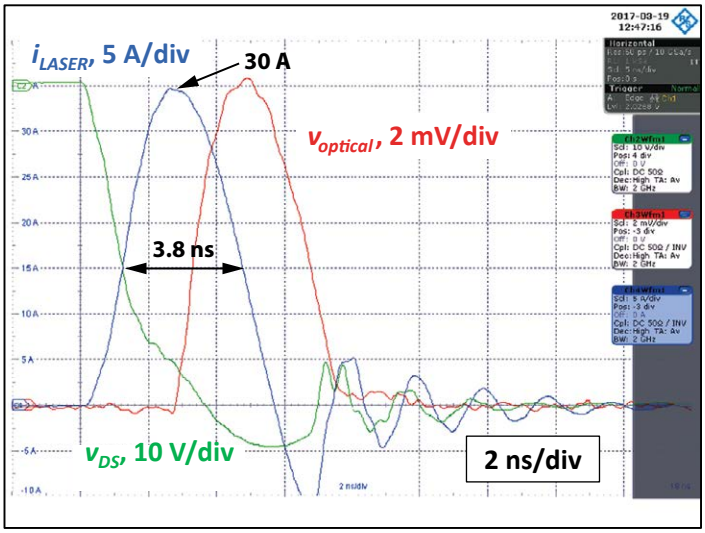


图10: 基于75 V_{IN} 的 EPC2016C GaN FET的EPC9126激光驱动器的实验结果。当t_w为3.4 ns时，其峰值电流I_{DLpk}是35 A。

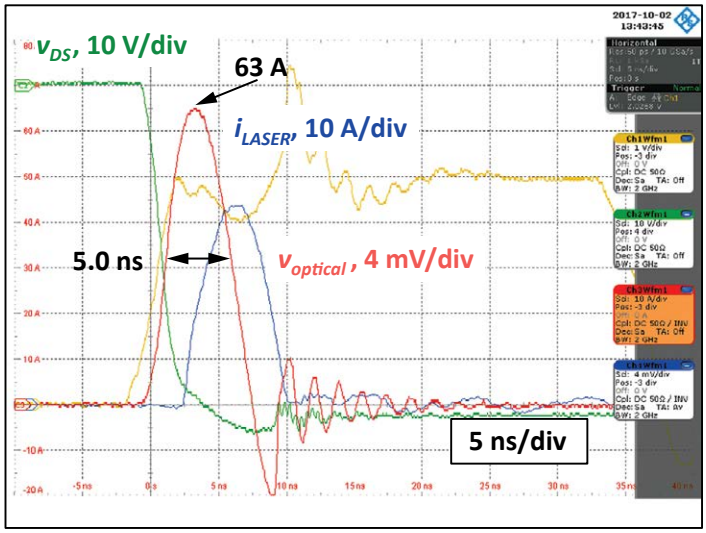


图11: 基于75 V_{IN}的EPC2001C GaN FET的EPC9126HC激光驱动器的实验结果。当t_w为5.0 ns时，其峰值电流I_{DLpk}是63 A。

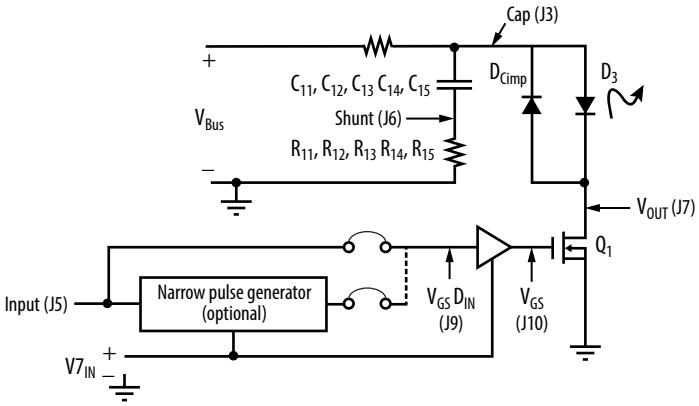


图12: EPC9126xx的方框图。

输入和输出

使用射频技术是因为激光脉冲驱动器具有快速开关速度的优势，尤其是电缆线及测量采用控制电阻器及50 Ω的标准电阻器。如果你不太了解，请在开始设计前，参阅相关的资料。其中一个很好的参考资料可以在参考文献[22]找到，因为详细的阐析不在本笔记的讨论范围之内。

输入端的终端是连接一个具有低电感的50 Ω电阻器（并联两个100 Ω电阻），及直接输入一个阈值电压为2.5 V的电流感应比较器。当用50 Ω电缆线连接至脉冲发生器时，会出现最小化的振铃和反射。如果希望用逻辑栅极直接驱动电路板，由于很多逻辑栅极的输出阻抗可以达数百欧姆，因此它们不会驱动输入到足够高的电压水平。这样，可以移除输入端的电阻器，但连接至逻辑栅极则必须具有最小化的振铃或脉冲反射。如果设计者不了解，请参看之前提及的相关参考资料。

所有输出支持50 Ω负载。最好利用50 Ω电缆线连接至采用50 Ω内部输入的示波器。请留意在示波器输入端使用外部50 Ω接线端子，而示波器输入被设置为1 MΩ，这是可以的，但带宽将受限于1 MΩ输入连接的典型输入电容。该电容常常会限制测量带宽在200 MHz以下，使上升时间最小化--接近1 ns，这比它们实际上的速度看来慢很多。

安装激光器

EPC9126xx的设计使得封装和安装激光器或其它负载可以非常灵活。通孔之间有100 mil的间距，从而可以安装带引脚的激光二极管封装。而且，可为Excelitas表面贴装激光二极管提供占板空间。最后，板上有各个裸焊盘，从而可以灵活安装不同的封装，或甚至是激光裸片。图13展示安装激光器的一些可行方法。

共振电容器

当电感最小化后，设计工程师可控制的主要参数是电压和共振电容。共振电容器应该具有NPO/C0G陶瓷介质或是其它具有低损耗和线性、稳定介质的电容器，例如陶瓷、玻璃或云母。

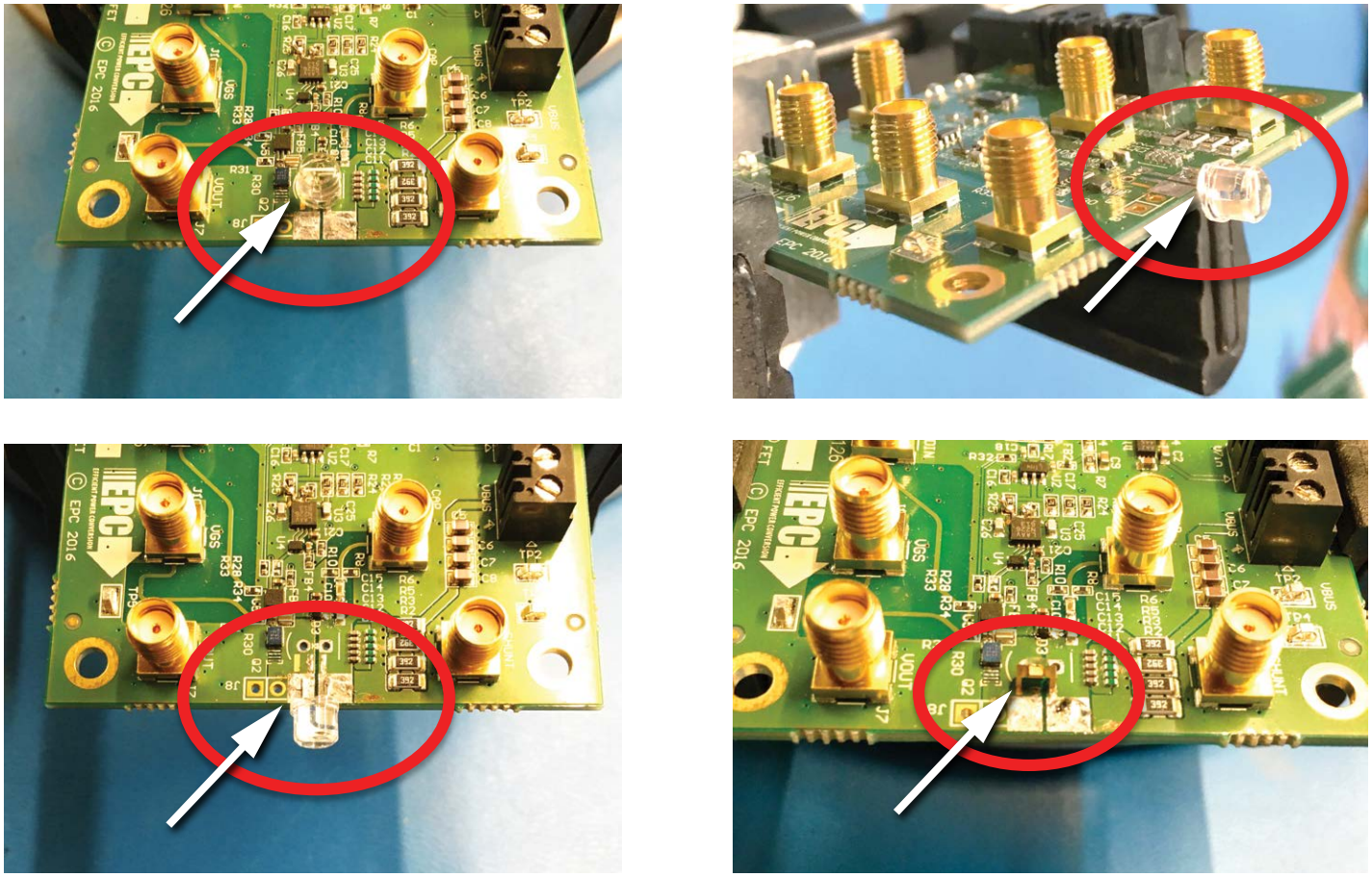


图13: 在EPC9126xx上安装激光器或其它负载的不同方法。左上: 通孔安装的常规。右上: 顶部的激光阳极引线和PCB底部的的阴极引线。左下: 顶部是激光器的两条引线。右下: 表面贴装激光器。

充电电阻器

共振电容通过充电电阻器R1（在EPC9126xx的R_2、R_3、R_5、R_6并联组合而成）进行充电，时间常数τ_{chrg}由（1）给出。由于需要$t = 5\tau_{chrg}$对共振电容进行充电到最终值大于99%，我们可以设置脉冲重复频率（PRF）的最大值为$1/5 \cdot \tau_{chrg}$。如果设计师需要更高的PRF值，他们可把激光输出降低，或是降低R_1值。当导通时，减小R_1会有额外电流流至Q_1，但如果$5\tau_{chrg} >> t_w$，这是很大可能可以接受的。

从图5的理想共振系统和图6的相关波形图可以看到，除了电容器C_1第一次充电外，电容器的初始状态是$V_{C1}(t_2) = V_{IN} - 2V_{DFL}$。这大约是在充电时，所有功耗都在$R_1$，及在$R_1$的能耗是：

$$E_{R1chrg} = 2C_1(V_{BUS} - V_{DFL})^2 \quad (10)$$

这与R_1没有关系。所得出的功耗是：

$$P_{R1chrg} = PRF \cdot E_{R1chrg} \quad (11)$$

在高脉冲重复频率（PRF）下，功耗可以很大，而且是激光器固有的功耗以外的额外功耗。如果功耗过大，应考虑升压转换器等不同的充电方式，这些方式不在本笔记的讨论范围之内。

传输线探头

除分流器的测量数据外，所有SMA的感测均采用传输线电压探头原理，从而在亚纳秒时间范围内，保持波形保真度。这种探头通常具有相对地较低的探测阻抗，大约是500至5k，但阻抗几乎全部从电阻而来，以及带宽可以非常高，即数GHz。PCB内置探头，以实现近乎理想的连接至所需节点，从而提高波形的保真度和可重复性。探头也不会滑出各个测量点，这是测量电路的高压点的一个重要考虑因素！这些探头的基本原理在参考文献[23]中讨论。

要从内置探头取得有用的测量数据，探头必须具备三个特性。第一，它们必须连接到示波器，设置示波器的输入为50 Ω。使用带有50 Ω端接器的1 MΩ输入将严重地限制几乎所有示波器的带宽，因此我们不建议使用。

第二，必需考虑每个内置探头都有其衰减系数。第三，探头具低阻抗，这代表在具有高平均DC电压的测量点，例如漏极电压，其功耗可以很大。为了防止这些功耗，在高压测量时，测量点配备DC阻断电容器。这形成了一个高通滤波器，对典型的波形的影响很小。但是，如果使用长脉宽，这些测试点可能会产生错误的结果，因此应该使用外部探头。内置传输线探头已经通过验证，其结果与Tektronix P9158、3 GHz的传输线探头几乎相同[24]，因此其估计带宽至少是3 GHz。

电流感测

噢，电感感测就是功率电子所希望根除的祸害！

脉冲激光驱动器的电流感测有其优点及缺点。其优点包括操作验证、激光脉冲的定时测定、在保持眼睛安全而同时控制最大范围的光功率。然而，电流感测有许多缺点，包括增加电感、增加功耗、波形精准度差、成本以及为除去电感而降低激光驱动器的电压。

EPC9126xx具电流测量能力，它采用由五个0402电阻组成的电流分流器，从而把增加的电源回路电感最小化。激光驱动器具有低占空比，使得在很大电流下，都可以用这些很细小的电阻器。为了实现具有电感而同时把该电感对性能的负面影响降到最小，在电流分流器需要作出一些妥协，结果是可能大大影响电流波形。

通常，最理想是分流器具有很小的电阻值，从而使得由高峰值电流所引起的压降得以最小化。不幸的是，即使是五个尺寸为0402的并联电阻的很小电感，也可以对分流器的阻抗产生很大的影响，从而影响测量值。要保守估计该影响，可以从假设边缘过渡时间为t_t = 2 ns的矩形脉冲得出。最大3 dB带宽的脉冲的估计值，可从以下（12）方程式计算出来：

$$f_w \cong \frac{0.35}{t_t} = 175\ MHz \quad (12)$$

要估算从分流器来的部分电感(L_{1shunt})，可利用安装在PCB上的铜箔取代激光二极管，并观察Q_1打开时的振荡频率，得出L_{1shunt}为1.21 nH。然后利用倒装的并联电阻来估算电感。最后用铜箔替代分流电阻器并进行测量。结果如表2所示。

从表2的估算，与没有分流器相比，右侧竖立的分流电阻的$L_{shunt,A}$ 值为200 pH，而倒装的分流器的$L_{shunt,B}$ 值为40 pH。当f_w = 175 MHz时，$L_{shunt,A}$的感应电抗为：

$$|Z_{shuntA}| = 2\pi f_w L_{shunt,A} = 0.176\ \Omega \quad (13)$$

分流器的电阻值至少是感应电抗的5倍，即$R_{shunt,A} \geqslant 1.1\ \Omega$。这将导致在峰值电流下，压降为39 V，这是晶体管的额定电压的40%。通过倒装各个分流电阻器，我们可以将其降低5倍，从而实现$R_{shunt,B} \geqslant 0.22\ \Omega$。基于所用元件，最终数值$R_{shunt}$是0.20 Ω。

设计	测试条件	振铃频率（MHz）	L_1 估计值 (nH)
A	常规安装分流电阻器	138	1.21
B	倒装分流电阻器	148	1.05
C	用铜箔替代分流电阻器	151	1.01

表2：测量分流器电感。

电感对波形的影响，可从图14看到当t_w是3.3 ns时，基于上述三种设计的分流器的简单仿真原理图。其结果是即使是PCB上的5个并联0402尺寸的电阻小至200 pH，也可以引致短脉冲出现极大的误差。电感的影响是为了区分部分的电流信号，这夸大了波形的初始部分和峰值。当脉冲越短时，其误差会越大。

不幸的是，倒装电阻是昂贵的，所以可供发货的电路板都是采用常规安装电阻的A类设计。如果有商业诱因，或可吸引到愿意倒装电阻的制造商。有一家制造商已经做到，但是在编写时据我所知道的，因为最大值太小，无法取得良好的测量结果[27]。如果要取得更精确的电流测量，必需倒装电阻或使用更大值，或者同时倒装及使用更大值。如果示波器采用可编程频率及single-pole cutoff形状的低通滤波功能，可在分流器的相同频率采用低通/pole来取消“零”，从而取得更准确的结果。

双缘控制

如前所述，共振电容放电激光驱动器具有一些优越的特性。然而，它们的主要局限是对于给定的电源回路电感，可以控制其脉冲高度，但是不能控制它的宽度。脉宽也可用于控制总脉冲能量，而且比脉冲幅度更容易控制，尤其是当单个脉冲需要这个控制。此外，在某些情况下，激光二极管或其它负载需要不在PCB内。这就需要若干互连，这会大大增加电感。要解决这些问题，可以使用双缘控制，即驱动FET的开启和关闭都用来控制脉冲形状。

为了将EPC9126xx与双缘控制结合使用，必须首先了解UCC27611栅极驱动器的局限性 -- 它的最小化脉宽似乎约为6 ns，虽然没有标明。这限制展示出脉冲可以有多短。

对于典型的双缘控制的应用，可能需要更换共振电容器和充电电阻。在电流必须受限的情况下，可用充电电阻，因为在总线电压输入到PCB处有额外的总线电容。

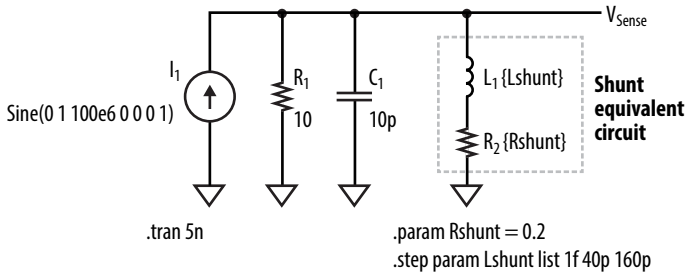


图14: 相等于典型分流器的仿真模型的电路。

最后，必需考虑当开关是在关闭的状态时，电源回路电感中的电流将被中断，这将导致FET和激光二极管或其它负载的漏极端产生振铃和过冲。这种振铃将取决于电感、关闭状态时的电流以及激光器、FET和PCB的电容。也可加入数个钳位二极管来控制电压过冲。

要找到合适的钳位二极管是非常困难的。大部分的二极管具有封装电感与电源回路电感，它们影响频率响应的速度。此外，如果钳位具有大电流，要采用具有大很多电容的较大二极管，这会增加额外的振铃。在某些情况下，这可能导致不需要的重复激光脉冲。作者此时未能为您推荐合适的钳位二极管。

在双缘控制应用采用EPC9126xx器件时，我们建议必需小心计划仿真和实验。后者尤为重要，因为作者的经验是，所选的二极管的电压及电流额定值，在具有极短转换时间的激光雷达应用中，模型不能准确地展示二极管的性能。

窄脉冲发生器

EPC9126xx还包括一个基于经Jim Williams设计[25]的窄脉冲发生器。该电路预设为未激活，而脉冲输入直接进入栅极驱动集成电路。但是，通过改变0 Ω跳线，可以利用电路产生非常短的脉冲。要使用这个电路的读者，应该参考Williams的应用笔记。

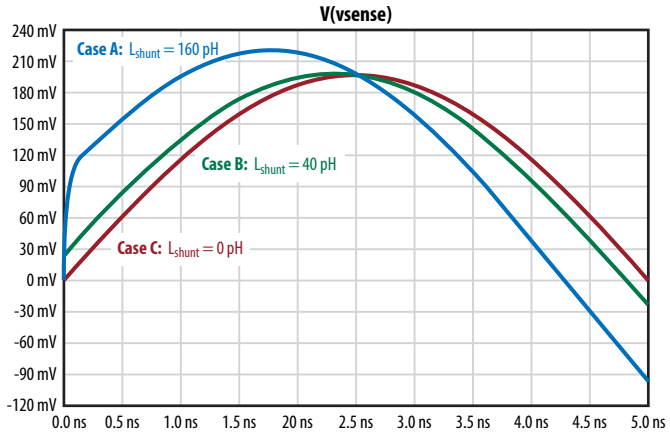


图15: 根据图14的仿真模型结果的三个分流器的串联电感值

结论

氮化镓功率晶体管具备卓越性能，支持半导体业界实现开创性的高性能激光驱动器。它能够产生数纳秒高电流脉冲，从数平方毫米提供数百瓦功率。因此，氮化镓技术是在小外形尺寸内实现不昂贵的高性能激光雷达设计的其中一个重要因素，从而成为促进革命性激光雷达技术发展的驱动力。

参考文献

[1] J. Glaser, "How GaN Power Transistors Drive High-Performance Lidar: Generating ultrafast pulsed power with GaN FETs," IEEE Power Electronics Magazine, vol. 4, Mar. 2017, pp. 25–35.

[2] P. McManamon, Field Guide to Lidar, SPIE, 2015.

[3] EPC9126 Lidar Demo Board (https://epc-co.com/epc/Products/DemoBoards/EPC9126.aspx)

[4] EPC9126HC Lidar Demo Board (https://epc-co.com/epc/Products/DemoBoards/EPC9126.aspx)

[5] OSRAM Opto Semiconductors Inc., "SPL PL90_3 Datasheet," 2015.

[6] Excelitas Technologies, "Surface Mount 905 nm Pulsed Semiconductor Lasers Datasheet," 2016.

[7] S. Morgott, "Range Finding Using Pulse Lasers," Regensberg, Germany: Osram Opto Semiconductors, 2004.

[8] S.A. Hovanessian, Radar System Design and Analysis, Norwood: Artech House, Inc, 1984.

[9] M. Andersson and J. Kjörnsberg, "Design of Lidar-system," Lund University, 2014.

[10] A. Lidow, J. Strydom, M. de Rooij, and D. Reusch, GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Wiley, 2015.

[11] Efficient Power Conversion Corp., "EPC2016C data sheet," 2018.

[12] Efficient Power Conversion Corp., "EPC2022 data sheet," 2018.

[13] J. Glaser, " High Power Nanosecond Pulse Laser Driver using a GaN FET", PCIM Europe 2018 Proceedings, 2018.

[14] J. Glaser, " Kilowatt Laser Driver with 120 A, sub-10 nanosecond pulses in < 3 cm2 using a GaN FET", PCIM Asia 2018 Proceedings, 2018.

[15] R.W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Springer, 2001.

[16] M. Pavier, A. Woodworth, A. Sawle, R. Monteiro, C. Blake, and J. Chiu, "Understanding the Effect of Power MOSFET Package Parasitics on VRM Circuit Efficiency at Frequencies above 1 MHz," PCIM Europe 2003 Proceedings, 2003.

[17] D. Reusch, J. Strydom, and A. Lidow, "A new family of GaN transistors for highly efficient high frequency DC-DC converters," 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015, pp. 1979–1985.

[18] Velodyne Lidar Inc., "Velodyne Lidar Puck VLP-16 data sheet," 2017.

[19] D. Reusch and J. Strydom, "Understanding the effect of PCB layout on circuit performance in a high frequency gallium nitride based point of load converter," 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013, pp. 649–655.

[20] Efficient Power Conversion Corp., "EPC9126 Lidar Development Board Quick Start Guide, Rev. 2.5," 2016.

[21] Efficient Power Conversion Corp., "EPC9126HC Lidar Development Board Quick Start Guide, Rev. 1.0," 2017.

[22] H. Johnson and M. Graham, High-Speed Digital Design – A Handbook of Black Magic, Prentice Hall PTR, 1993.

[23] J. Weber, Oscilloscope Probe Circuits, Tektronix Inc., 1969.

[24] Tektronix Inc, "20X Low Capacitance Probe – P6158 Datasheet," 2017, (https://download.tek.com/datasheet/P6158-Datasheet-60W120263_0.pdf)

[25] J. Williams, "AN98 Signal Sources, Conditioners, and Power Circuitry – Circuits of the Fall, 2004: Nanosecond Pulse Width Generator," Linear Technology Corporation, 2004.

[26] http://ucanr.edu/blogs/green//blogfiles/11605_original.png

[27] Susumu 2018 Product Catalogue (EN), 2018-04-06, pp. 53-54. 2018, (https://www.susumu.co.jp/common/pdf/n_catalog_partition09_en.pdf?v=20180406)