Adaptation des drivers de grille de transistors de puissance GaN en mode enrichissement

par Yong Ang, Directeur Marketing Stratégique, ON Semiconductor

Les dispositifs à base de nitrure de gallium (GaN) sont ce qui se rapproche le plus du commutateur semiconducteur idéal, puisqu'ils assurent une conversion d'énergie avec un rendement très élevé, et donc avec une densité de puissance élevée. Cependant, les dispositifs GaN ne sont à certains égards pas aussi robustes que ceux issus des technologies silicium classiques, et doivent donc être mis en œuvre avec soin, et avec un driver de grille adapté, pour fournir des performances et une fiabilité optimales. Cet article examine les problèmes posés, et présente une solution pour réduire les risques au niveau conception.

Les transistors HEMT (High Electron Mobility Transistor) à base de nitrure de gallium (GaN) permettent d'obtenir des convertisseurs d'énergie non seulement avec des rendements de bout en bout supérieurs à ceux des solutions actuelles à base de silicium, mais aussi qui dépassent largement les spécifications "80+" les plus strictes applicables aux serveurs et aux centres de données Cloud, ainsi que la Préconisation européenne Niveau 2 pour les adaptateurs USB PD externes. Si les anciennes technologies de commutation à base de silicium peuvent revendiquer des performances proches de l'idéal, avec une commutation rapide et à faibles pertes, les dispositifs GaN sont encore plus performants, mais ils ne peuvent prétendre remplacer purement et simplement leurs homologues silicium dans des circuits existants. Pour tirer pleinement parti de cette technologie, le circuit de commande externe doit être adapté au dispositif GaN, et le circuit imprimé doit être implanté avec soin.

Comparaison des commutateurs GaN et Si

Le rendement supérieur est le principal avantage potentiel du GaN en mode enrichissement, par rapport aux commutateurs silicium (Si). Contrairement à son homologue en mode appauvrissement, le GaN en mode enrichissement est un dispositif normalement OFF (éteint), qui a donc besoin d'une tension de grille positive pour passer ON (allumé). Le rendement supérieur du GaN en mode enrichissement vient des plus faibles capacitances du dispositif, et de la capacité du GaN à conduire en sens inverse (troisième quadrant) avec une charge de récupération inverse nulle ; un avantage majeur dans les applications "à commutation franche". Les faibles capacitances entre grille et source, et entre grille et drain,

se traduisent par une faible charge globale de grille, ce qui permet une commutation de grille rapide et une faible dissipation au niveau du circuit driver de grille. En outre, la faible capacitance de sortie génère de faibles pertes à l'extinction. D'autres différences susceptibles de compromettre malgré tout les performances pratiques du GaN sont l'absence de valeur nominale de tension d'avalanche drain-source/grille, et une valeur maximale de tension de grille relativement faible (en général +/-10V seulement, contre +/-20V environ pour des MOSFET silicium). De plus, le seuil d'allumage (V_{GTH}) du GaN, autour de 1,5 V, est très inférieur à celui d'un MOSFET Si, qui est d'environ 3,5V. Si l'on s'arrange pour que le circuit de pilotage externe et le circuit de charge commandent les tensions de source et de grille de manière fiable, la fréquence de découpage peut être poussée à plusieurs centaines de kHz voire au niveau du MHz, ce qui permet de maintenir un rendement élevé et ainsi de réduire la taille des composants magnétiques et des condensateurs pour obtenir des densités de puissance en W/cm^3 impressionnantes.

Le pilotage de grille GaN est la clé de la performance

Le maintien des tensions de grille entre les valeurs absolues maximales n'est pas la seule exigence. Pour commuter le plus rapidement possible, un dispositif GaN typique doit être piloté avec une tension $V_{G(ON)}$ optimale d'environ +5,2V pour un enrichissement maximal, sans que le pilotage de la grille ne donne lieu à une consommation excessive. La puissance P_D nécessaire au pilotage est donnée par :

$$P_D = V_{SW}.f.Q_{GTOT}$$

Où V_{SW} est l'excursion totale de la tension de grille, f est la fréquence de commutation et Q_{GTOT}, la charge globale de grille. Bien que la grille GaN soit effectivement capacitive, l'énergie est dissipée dans la résistance série effective de la grille et dans le circuit de pilotage. Il est donc important de limiter l'excursion de la tension de grille à une valeur minimum, surtout si la fréquence est très élevée. La charge Q_{GTOT} est en général de quelques nC pour le GaN, soit environ 10 fois moins que pour un MOSFET silicium équivalent, c'est l'une des raisons pour lesquelles le GaN es capable de commuter aussi rapidement. Les dispositifs GaN sont commandés par charge électrique, donc pour commuter en quelques nanosecondes avec une charge de grille de quelques nanocoulombs, le courant crête doit être de l'ordre de 1A, qui doit être fourni par le driver tout en maintenant une tension précise.

En théorie, les dispositifs GaN s'éteignent en toute sécurité si $V_{GS} = 0$, mais en pratique, même les meilleurs drivers de grille ne peuvent pas appliquer 0V directement sur la grille. Toute inductance L en série, dans la (patte ou broche) source commune à la boucle de commande de grille, génère une tension V_{OPP} opposée à celle de la commande de grille, qui peut provoquer un allumage intempestif en cas de dérivée de courant source (di/dt) élevée,

selon la formule $V_{OPP} = -L\ di/dt$ (**Figure 1**). Le même effet peut être causé par ~~le courant de forçage~~ le dV/dt à l'état éteint à travers la capacité "Miller" du dispositif, mais dans le cas du GaN ceci est négligeable. Une solution consiste à appliquer une tension négative d'arrêt de grille de -2 ou -3V, mais cela complique le circuit de commande de grille et peut être évité grâce à une implantation minutieuse de la carte et à l'utilisation de dispositifs à connexions Kelvin et à une inductance de boîtier minimale, comme dans le cas d'un boîtier mince type PQFN sans pattes (ou broches).

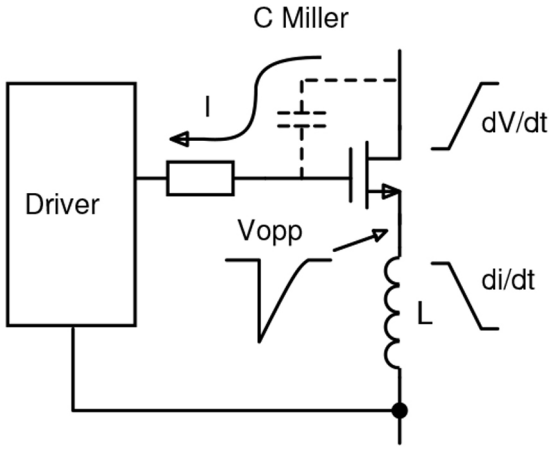


Figure 1 : L'inductance commune à la source et à la commande de grille génère des transitoires de tension

Les drivers de grille "High-side" présentent des difficultés spécifiques

Les dispositifs GaN ne constituent pas nécessairement le meilleur choix pour toutes les topologies, notamment pour la plupart des types "Flyback" et "Forward" à simple extrémité, avec lesquels il n'y a pas de conduction inverse et pour lesquels le surcoût par rapport à des MOSFET silicium pèse plus lourd que le faible gain de rendement que l'on pourrait obtenir. Cependant, certaines topologies "demi-pont" comme les PFC (Power Factor Correction, ou compensation de facteur de puissance) sans pont à totem, les convertisseurs à résonateur LLC, ou les alimentations à contrôleur "Flyback" à ~~pince~~ clamp actif, sont le domaine de prédilection du GaN, qu'il s'agisse de commutation "franche" ou "progressive". Ces topologies font toutes appel à des commutateurs "high-side" dont la source est un nœud de commutation, et dont la commande de grille est décalée par rapport à la masse selon un signal haute-fréquence de tension élevée avec des fronts de l'ordre de la nanoseconde. Le signal de commande de grille provient d'un contrôleur référencé par rapport à la masse système, de sorte que le driver "high-side" doit assurer le décalage du niveau de tension en supportant une tension nominale appropriée, généralement autour de 450 V ou plus. Il faut aussi un moyen de générer un rail d'alimentation basse tension pour le driver high-side,

typiquement avec un circuit à base de diode d'amorçage (ou bootstrap) et de condensateur, référencé par rapport au nœud de commutation. La signal de commutation stresse le driver avec une dérivée de tension (dV/dt) très élevée, qui dans le cas du GaN peut dépasser 100 V/ns. Cela induit un courant de déplacement du driver vers la masse, qui est susceptible de générer des tensions transitoires aux bornes des résistances en série et des inductances de connexion qui peuvent corrompre la tension différentielle de commande de grille. Le driver doit donc avoir une immunité élevée à la dérivée de tension dV/dt.
Pour une immunité maximale aux catastrophiques "shoot-through" (pics de tension transitoires) et un rendement optimal, les dispositifs à demi-pont, high-side et low-side, doivent être pilotés en garantissant toute absence de chevauchement, tout en réduisant les temps morts au minimum. Les drivers high-side et low-side doivent donc présenter des délais de propagation très bien contrôlés et parfaitement identiques.
Côté low-side, la masse du driver doit être reliée directement à la source du commutateur par une connexion Kelvin afin d'éviter une inductance commune. Cela peut poser problème car le driver dispose aussi d'une masse signal, qui peut elle-même ne pas être connectée de manière optimale. Pour cette raison, le driver low-side peut être doté d'une isolation ou d'une méthode pour séparer les masses puissance et signal avec une certaine tolérance sur la tension en mode commun.

Les drivers GaN peuvent nécessiter une isolation de sécurité

Les dispositifs GaN en mode enrichissement font aujourd'hui l'objet d'une grande attention pour les applications hors-ligne qui nécessitent une tension nominale élevée d'au moins 600V, à la fois pour le dispositif et pour son driver, bien que les applications basse-tension soient de plus en plus courantes. Si les signaux d'entrée du driver sont générés par un contrôleur dont les connexions sont physiquement accessibles, par exemple par le biais d'interfaces de communication, le driver aura besoin d'une isolation de sécurité appropriée. Ceci peut se faire avec un isolateur galvanique de signal rapide, avec une tension d'isolement appropriée. Maintenir les pentes des fronts du signal de driver et l'adaptation high-side et low-side devient problématique dans de telles conditions, même si le circuit du contrôleur peut souvent être référencé par rapport au primaire comme c'est le cas dans la plupart des convertisseurs CA-CC.

Exemple d'application -"Flyback à clamp actif "

Ceci est un exemple de topologie Flyback à clamp actif **(Figure 2**), qui utilise un commutateur high-side pour faire recirculer l'énergie vers l'alimentation, depuis l'inductance de fuite du transformateur du convertisseur. Comparé à une approche "snubber" ou limiteur franc à base de Zener, le rendement est plus élevé, les performances EMI (Electro Magnetic

Interference, ou parasite électromagnétique) sont meilleures, et le signal de drain est plus "propre", le circuit convenant par ailleurs aux applications faible puissance de 45W à 150W. Les applications typiques sont notamment les chargeurs de voyage compatibles USB PD pour téléphone ou ordinateur portable, ainsi que les alimentations intégrées.

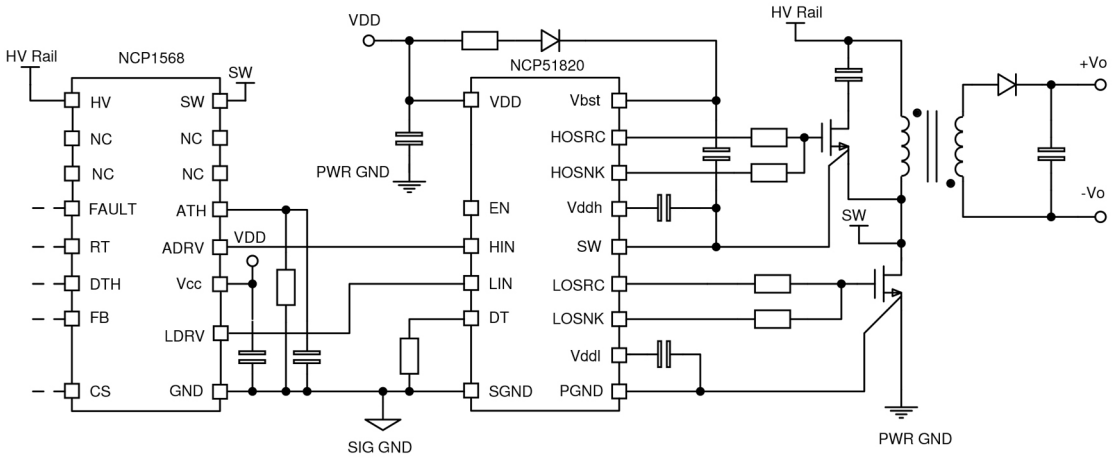


Figure 2 : Convertisseur Flyback à clamp actif, à base GaN

En Figure 2, un driver de grille dédié au GaN, le NCP51820 d'ON Semiconductor [1] est représenté avec un contrôleur Flyback à clamp actif NCP1568 [2] (détails omis). Le circuit de commande fait appel à des drivers de grille +5,2V régulé, pour un résultat optimal, aussi bien en high-side qu'en low-side, pour du GaN en mode enrichissement. Il dispose également d'une plage de tension en mode commun de -3,5V à +650V en high-side, et -3,5 à +3,5V en low-side, associée à une bonne immunité aux dérivées de tension dv/dt de 200 V/ns, grâce à une technologie avancée d'isolement de jonction. Ayant d'un décalage de niveau pour le driver low-side facilite la connexion Kelvin si une résistance de détection de courant est présente dans la source du dispositif low-side. Les temps de montée et de descente du signal de commande sont de 1 ns, avec un délai de propagation maximal de 50 ns et des sorties source et puits séparées pour high-side et low-side, afin de permettre l'adaptation des fronts de commande de grille pour un meilleur compromis entre EMI et rendement. Avec cette topologie, les commandes high-side et low-side ne se chevauchent pas, mais font appel à des largeurs d'impulsion différentes pour assurer une conversion/régulation de puissance avec limitation du drain et commutation à tension zéro, le tout contrôlé par le NCP1568.

Exemple d'application - convertisseur LLC

Aux puissances supérieures à 150W, on utilise souvent un convertisseur LLC résonnant pour son rendement élevé et le stress en tension limité qu'il exerce sur les commutateurs. L'une des caractéristiques de ce convertisseur est que les signaux de commande ont

chacun un rapport cyclique de 50%, la régulation se faisant par variation de la fréquence. Il est donc essentiel de bien contrôler les temps morts pour éviter tout chevauchement. La **Figure 3** montre un circuit typique avec un contrôleur LLC hautes-performances NCP13992. Une telle conception peut fonctionner à une fréquence de découpage de 500 kHz et sert typiquement dans les adaptateurs de jeux vidéos de haute puissance, et les alimentations embarquées dans les téléviseurs OLED ou les PC "tout-en-un".

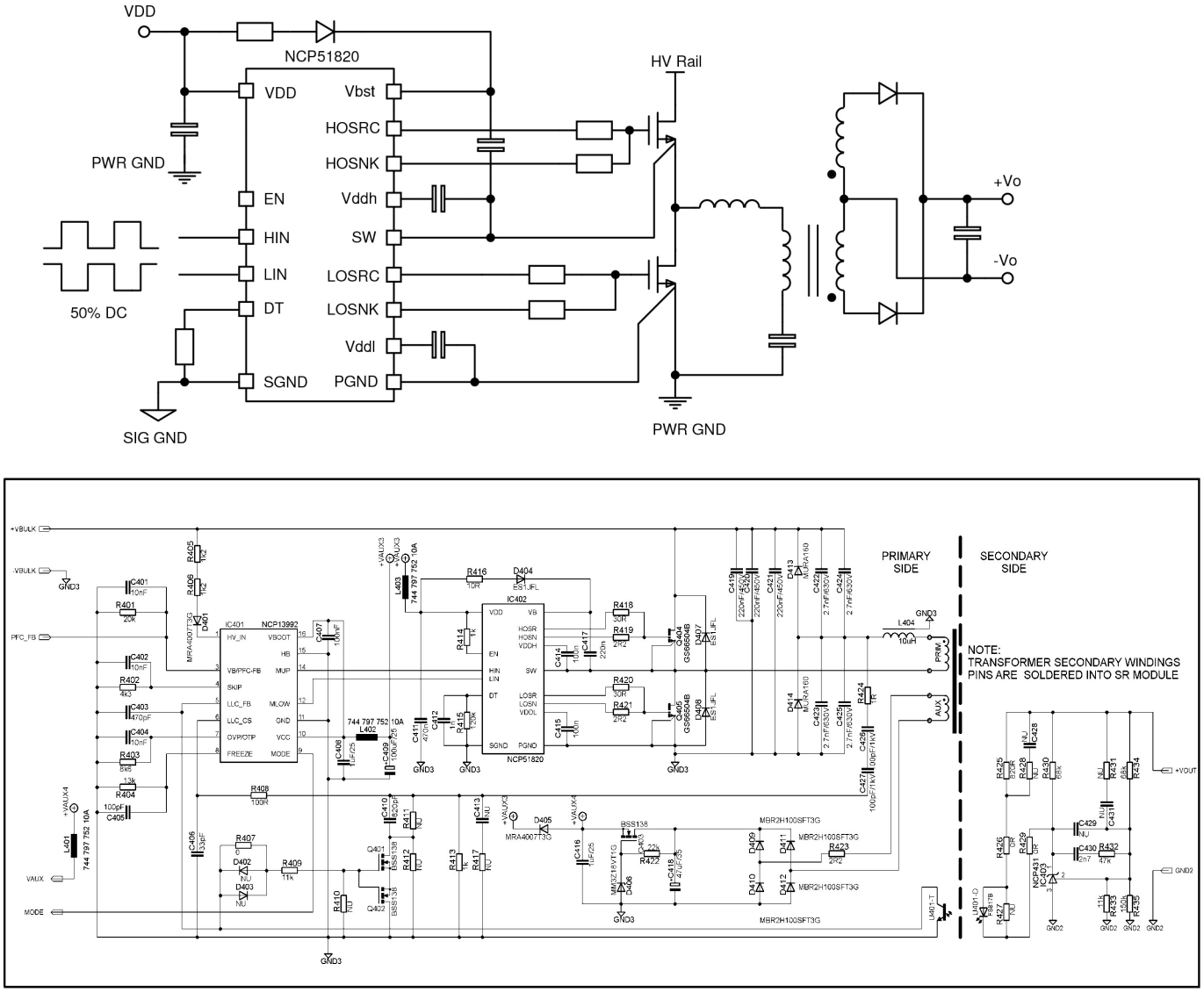


Figure 3 : Vue d'ensemble d'un convertisseur LLC à base GaN

Le driver NCP51820 d'ON Semiconductor représenté garantit que les commandes de grille ne se chevauchent pas, bien que ceci puisse être désactivé pour les topologies qui le requièrent (comme les convertisseurs de courant). Le dispositif comprend également une entrée Enable (activation) et une protection complète en cas de tension insuffisante ou de surchauffe de l'alimentation. Il se présente en boîtier PQFN de 4 x 4 mm à 15 contacts, permettant des connexions courtes et à faible inductance avec les dispositifs GaN.

Considérations d'implantation de carte

Pour toutes les applications, l'implantation de la carte est absolument critique pour la réussite. La **Figure 4** montre un exemple d'implantation avec le NCP51820 d'ON Semiconductor, qui simplifie et assure l'adaptation de la boucle de driver de grille. Les dispositifs GaN et le driver sont implantés sur la même face du circuit imprimé pour éviter les courants élevés dans les vias (trous métallisés) grâce à une bonne utilisation des plans de masse/retour.

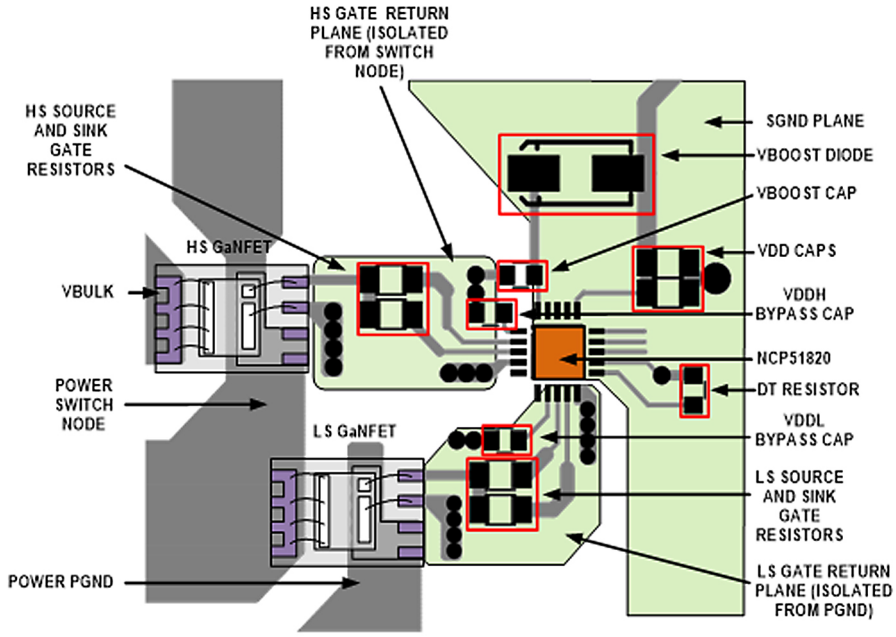


Figure 4 : Bonne pratique d'implantation des circuits de commande de grille GaN

Résumé

Les commutateurs GaN ont besoin d'une conception soignée de leur circuit de commande de grille pour obtenir les gains de rendement et de densité de puissance attendus, avec une bonne fiabilité opérationnelle, dans le cas d'applications réelles. Associé à une implantation soignée, l'utilisation d'un driver dédié comme le NCP51820 d'ON Semiconductor, avec toutes ses fonctionnalités pour commandes high-side et low-side, permet aux dispositifs GaN de fournir leurs meilleures performances.

Références

[1] On Semiconductor NCP51820

[2] On Semiconductor NCP1568
https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=NCP1568

[3] ON Seminconductor NCP13992

https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=NCP13992

FIN