

複数ピーク電流ミラーを用いた IGBTドライバ回路の検討

群馬大学 理工学部 電子情報理工学科

小林研究室 学部4年

阿部 優大

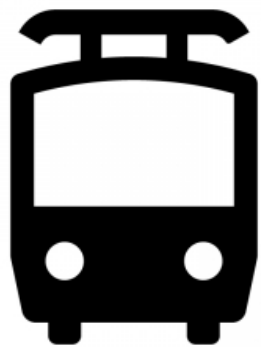
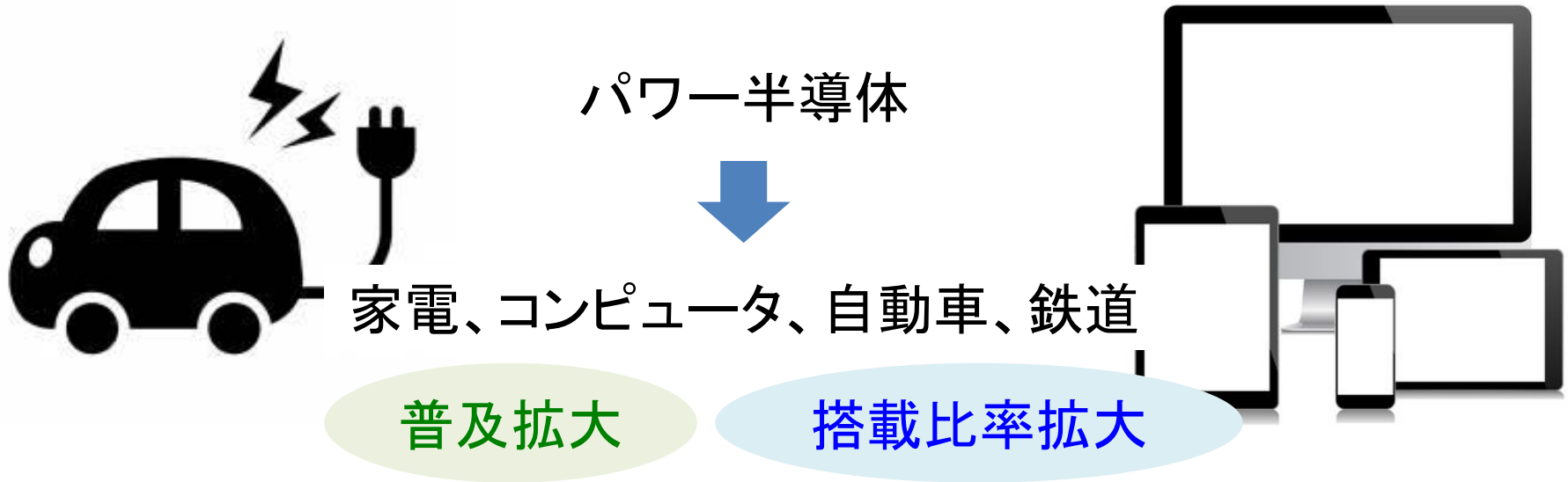
OUTLINE

1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

OUTLINE

1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

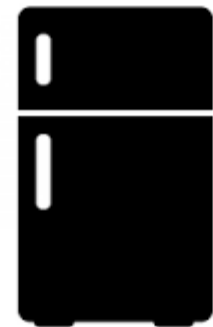
はじめに



IGBT

パワーエレクトロニクス業界で
大きな市場を形成

性能向上の必要性：大



IGBTとは

MOSFET

- 駆動電力:小
- スイッチング速度:早
- 高電圧でオン抵抗:大

+

バイポーラ・トランジスタ

- 通電損失:少
- スイッチング速度:遅
- 電流利得:低(高耐圧仕様)



IGBT

- 駆動電力:小
- 導通損失:小
- スイッチング速度:遅
- 高耐圧仕様
- オン抵抗:小

IGBTの問題点

コレクタ端子
配線の寄生インダクタンス



過度のオーバーシュート
リングング

各端子間
寄生キャパシタ



スイッチング損失

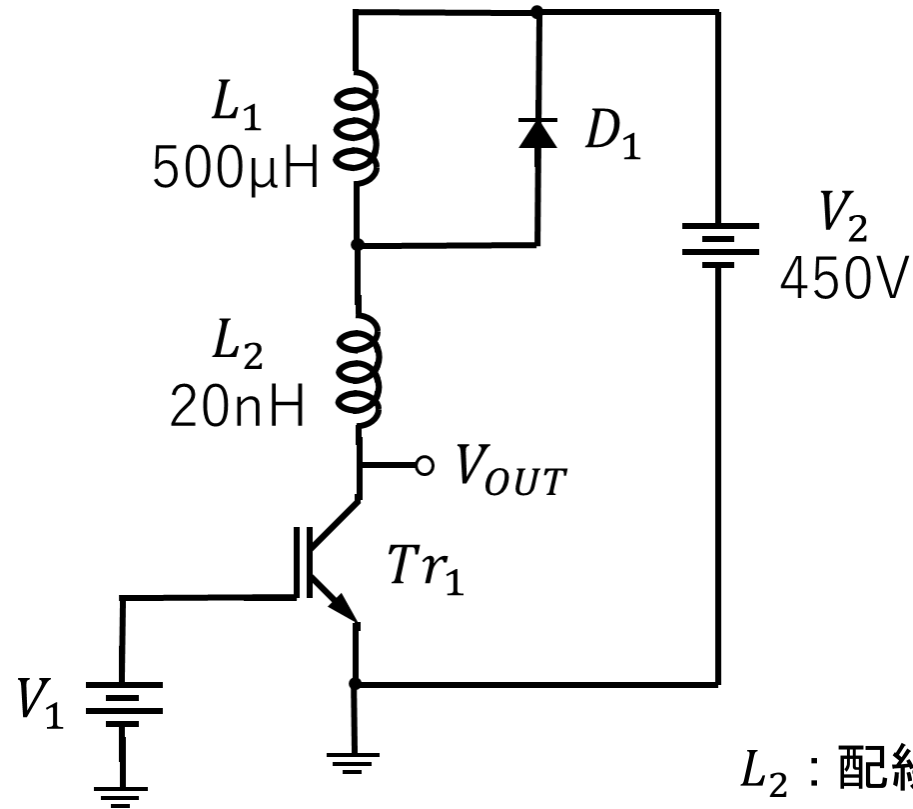
本研究ではトランジスタレベルの回路で検討

- スwitching損失低減
- オーバーシュート抑制

OUTLINE

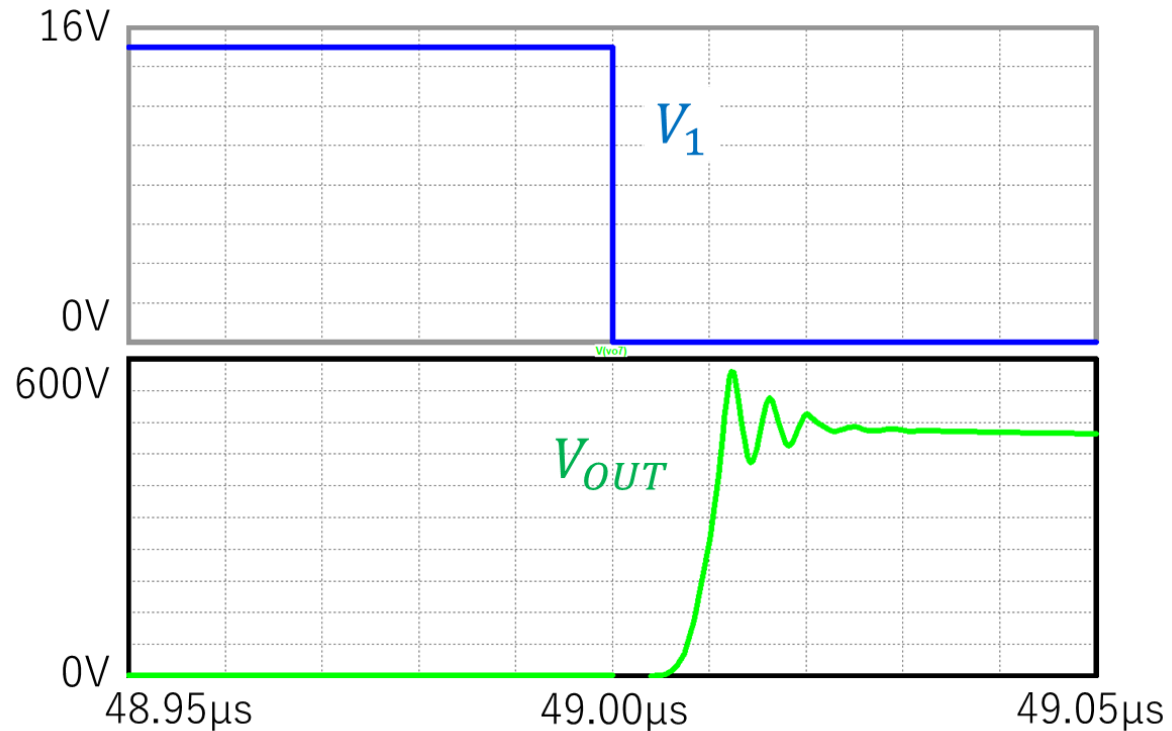
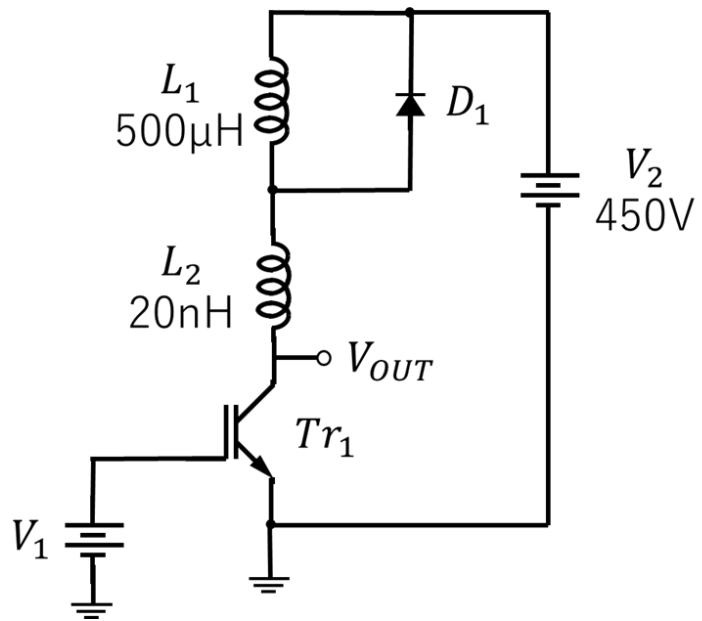
1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

評価回路



ターンオフ時の出力 V_{OUT} の
特性について検討

評価回路のターンオフ特性

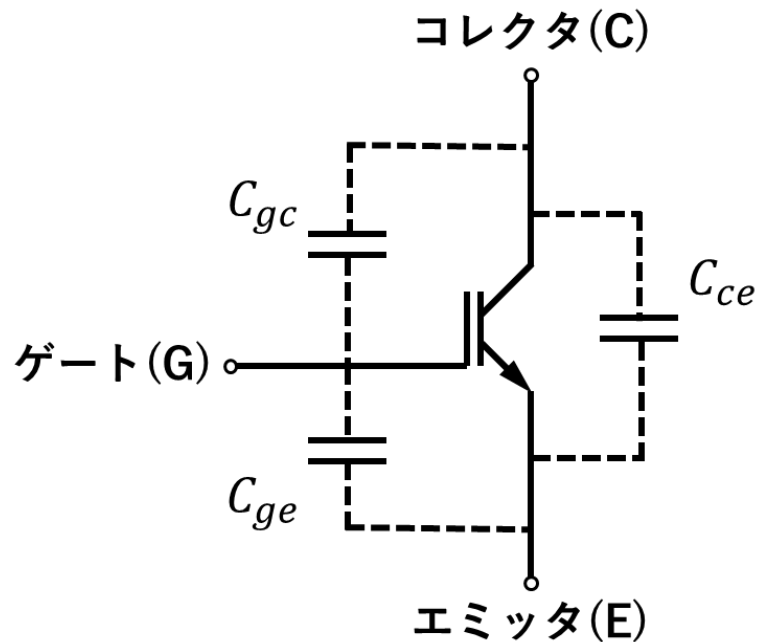


IGBTのターンオフ時に
オーバーシュート発生を確認

OUTLINE

1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

IGBTの寄生キャパシタ

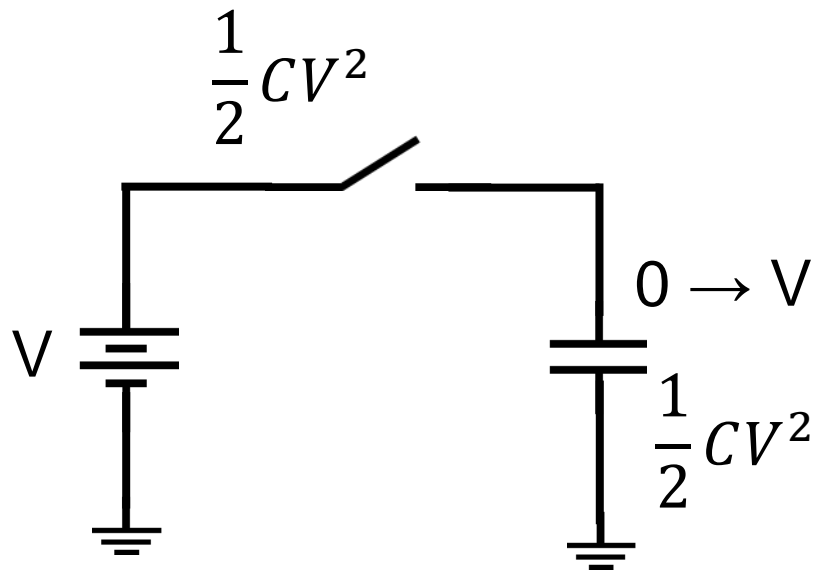


各端子間に
寄生キャパシタ： C_{gc} , C_{ge} , C_{ce}

スイッチの切り替わり時、寄生キャパシタの電荷が一気に放電することにより**スイッチング損失**発生

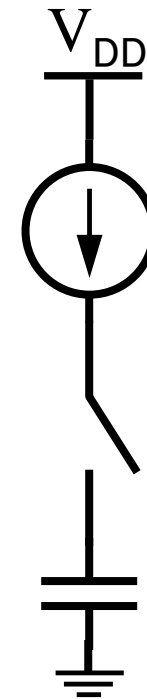
寄生キャパシタ対策

電圧源を利用



エネルギー損失： $\frac{1}{2}CV^2$

電流源を利用

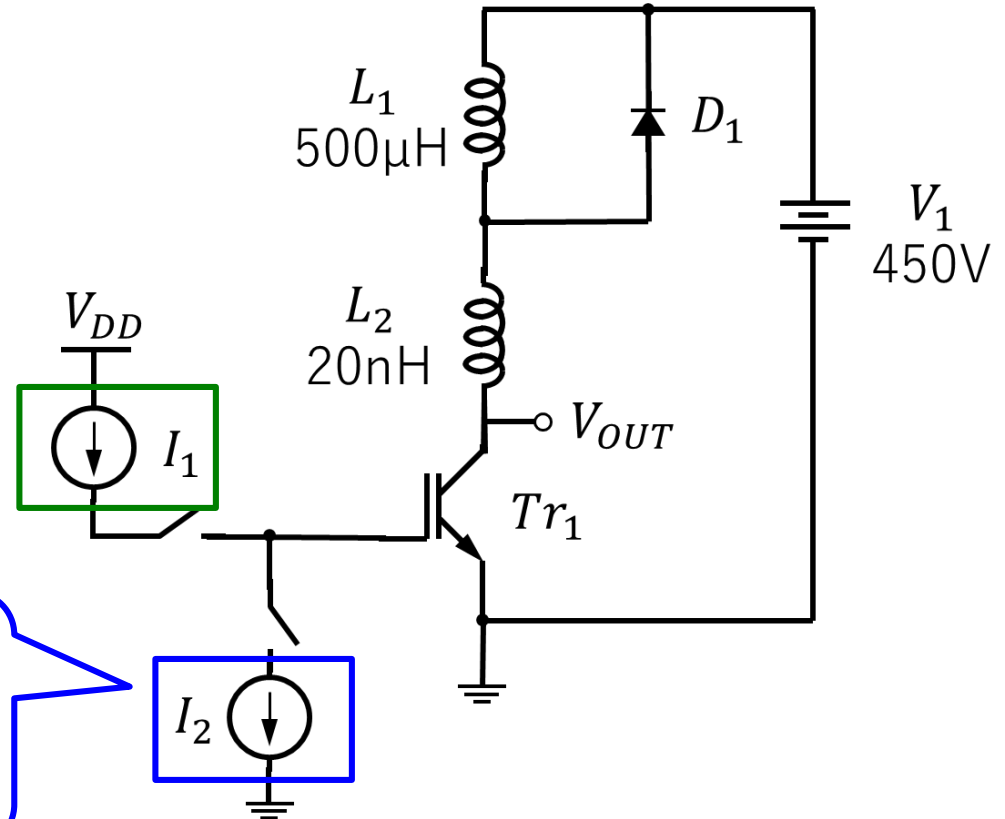


エネルギー損失：なし

定電流駆動による評価回路

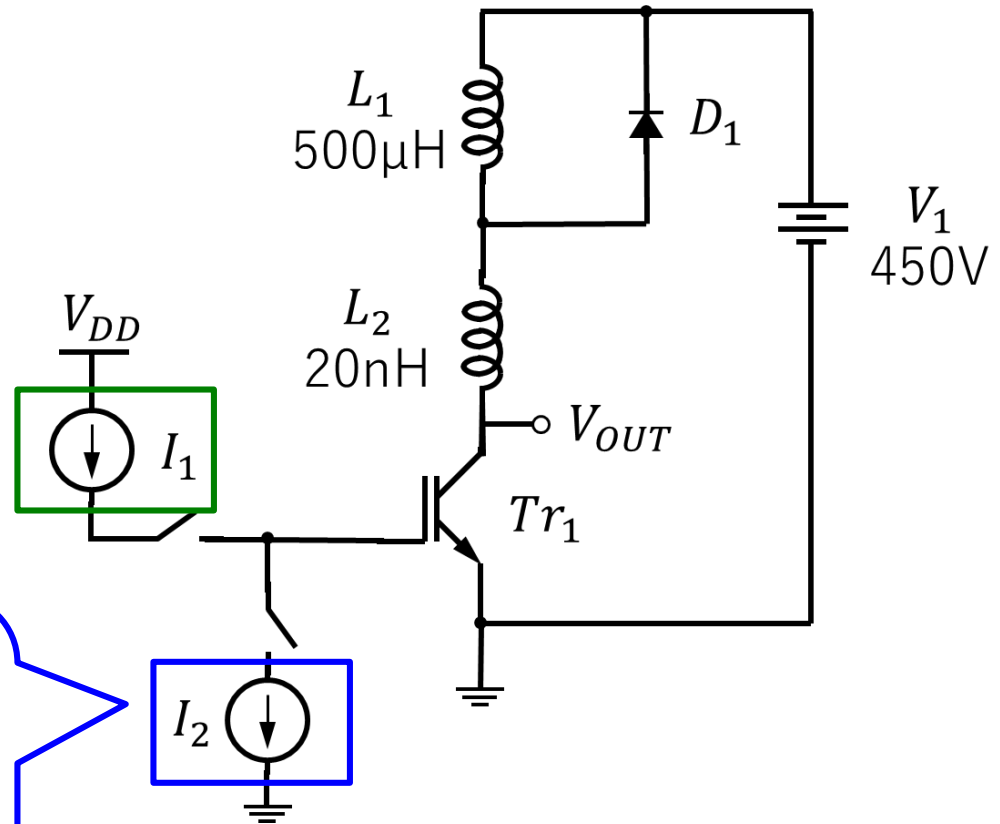
I_1 : 微小定電流により
IGBTをオンにする

I_2 : 短時間で
電流を引き抜き
IGBTをオフにする



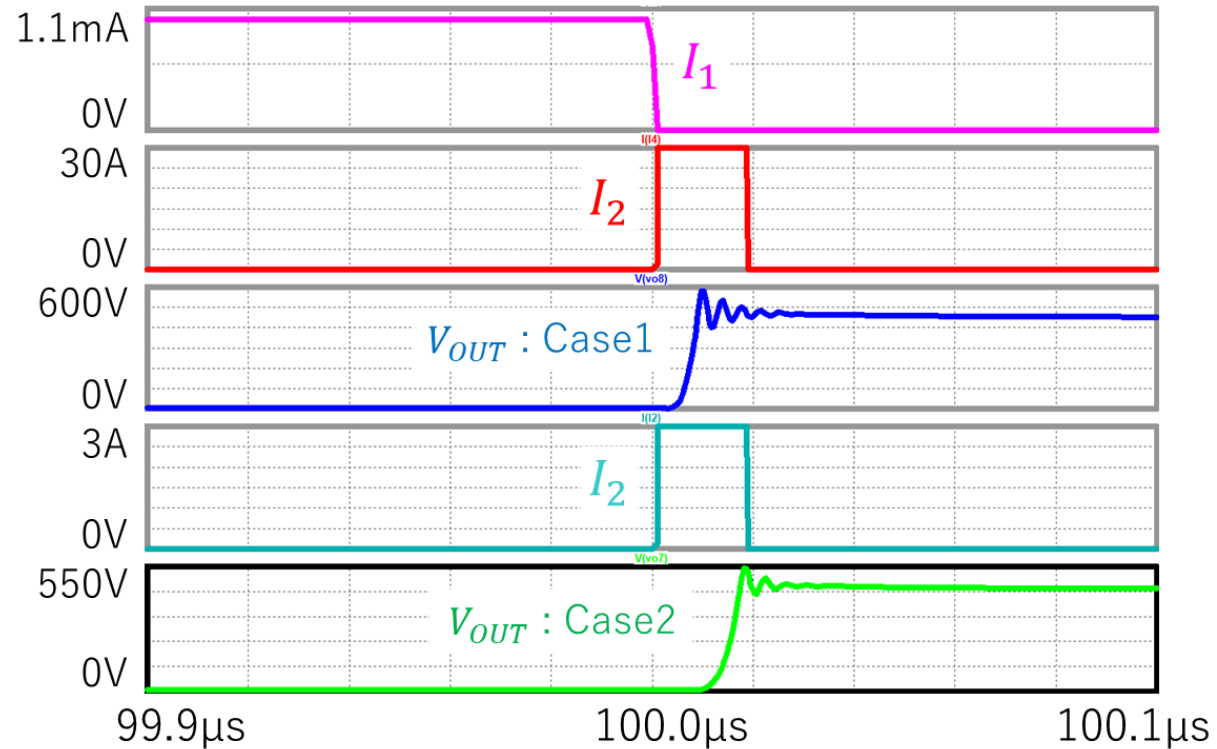
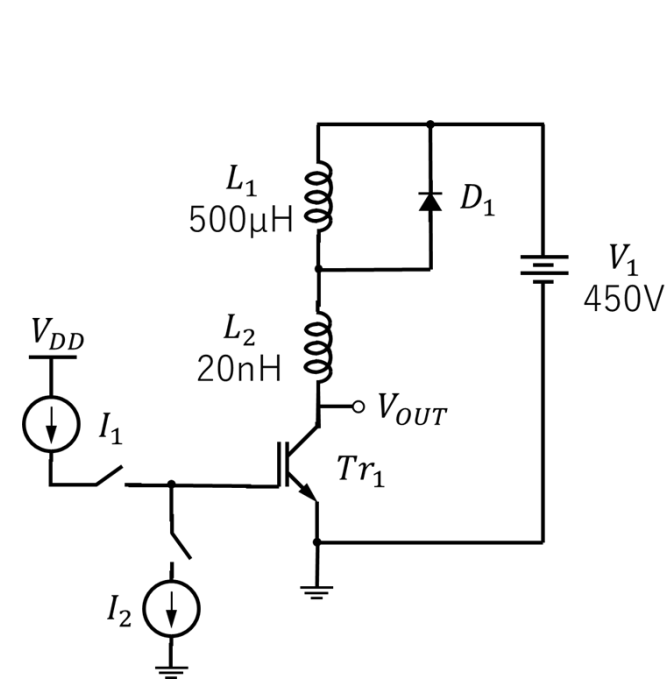
評価回路(定電流駆動)のシミュレーション

I_1 : 1mA, 100 μ sで充電



I_2 : Case1 \rightarrow 30A, 0.018 μ s
で引き抜き
Case2 \rightarrow 3A, 0.018 μ s
で引き抜き

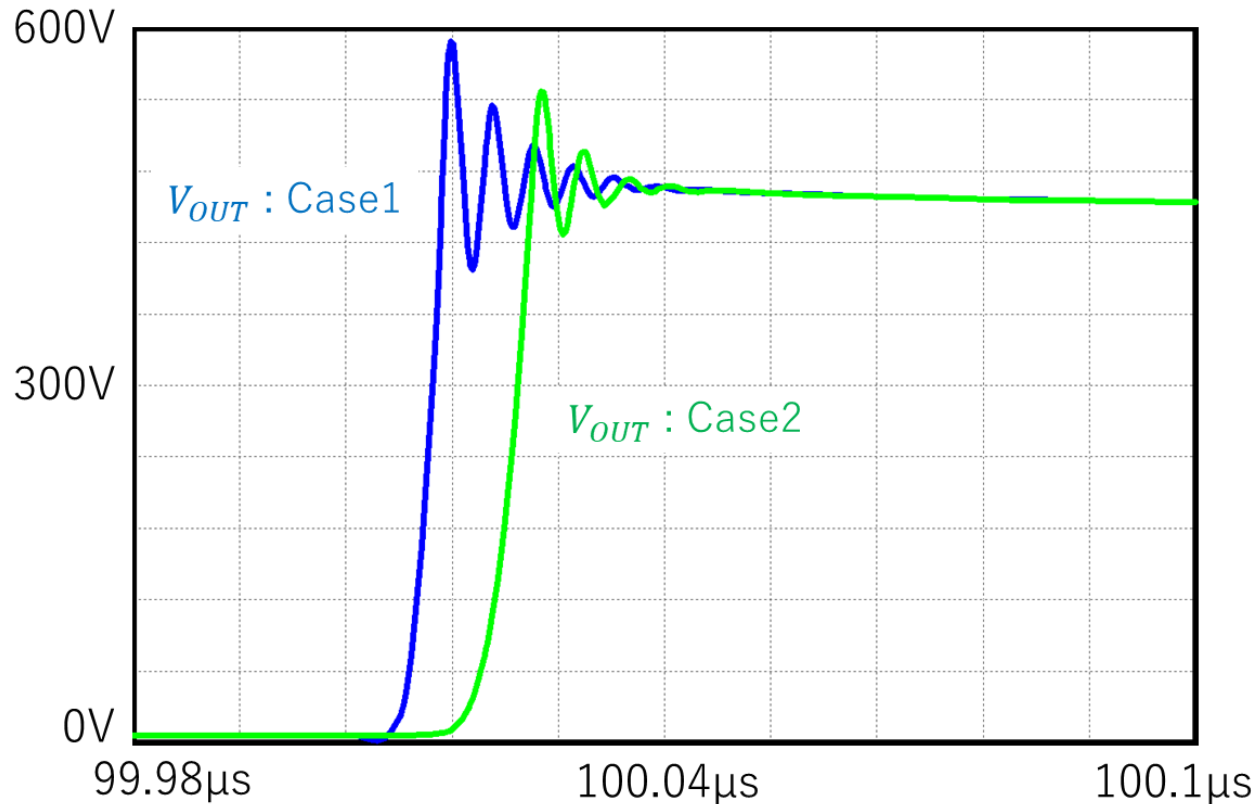
評価回路(定電流駆動)のターンオフ特性



オーバーシュート : Case1(30A) → 147.4V

Case2(3A) → 95.5V

Case1, Case2の比較



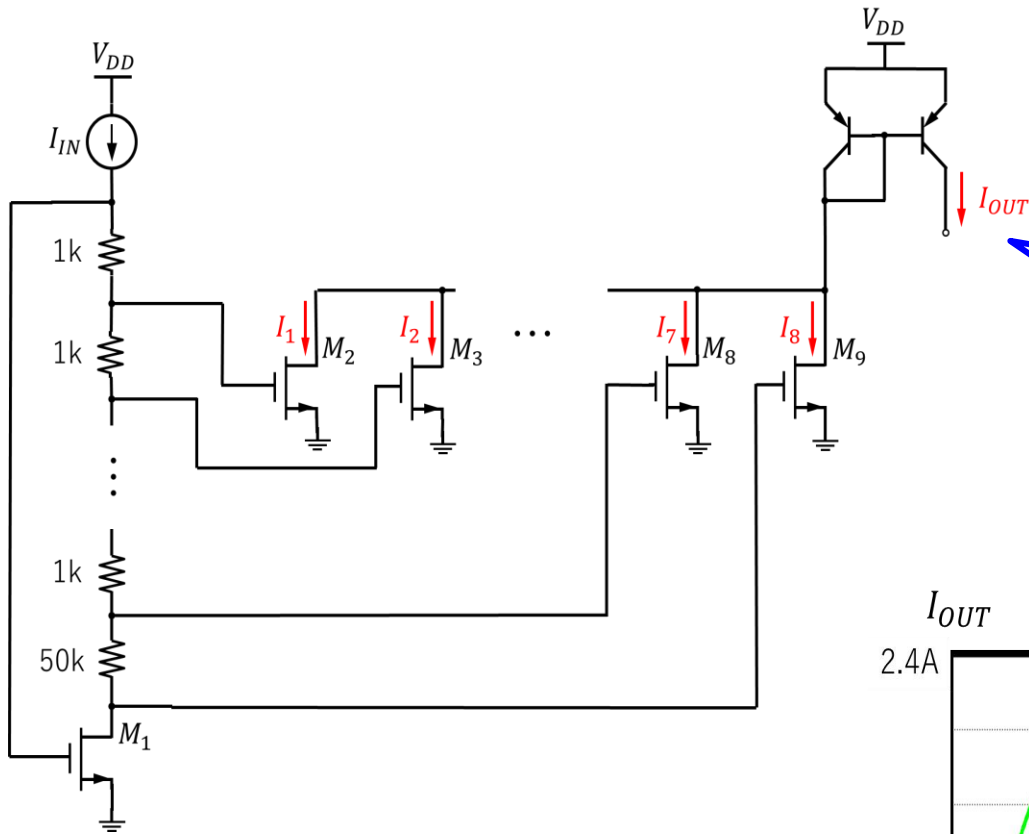
Case1(30A)
オーバーシュート：大
立ち上がり時間：短

Case2(3A)
オーバーシュート：小
立ち上がり時間：長

OUTLINE

1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

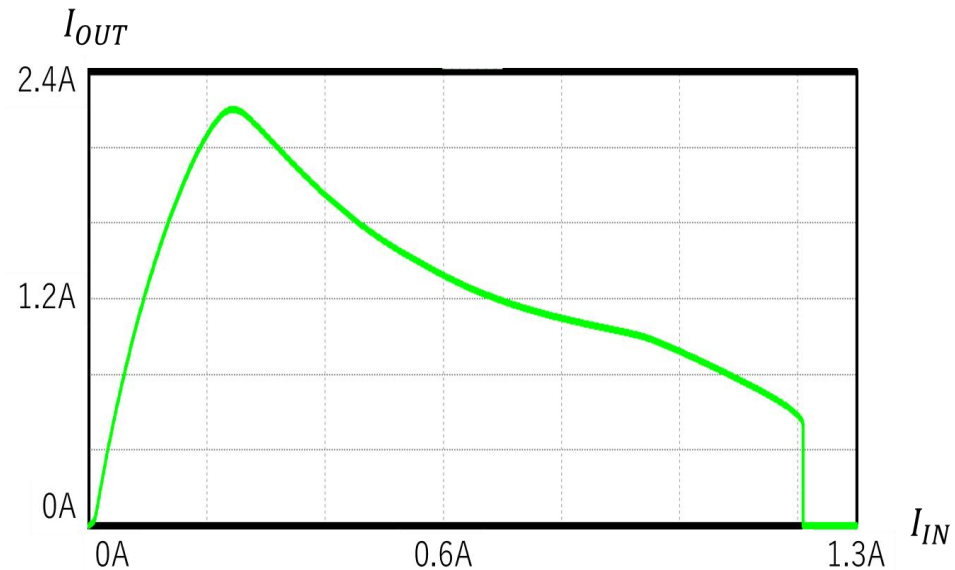
複数ピーク電流ミラー回路(nMOS)



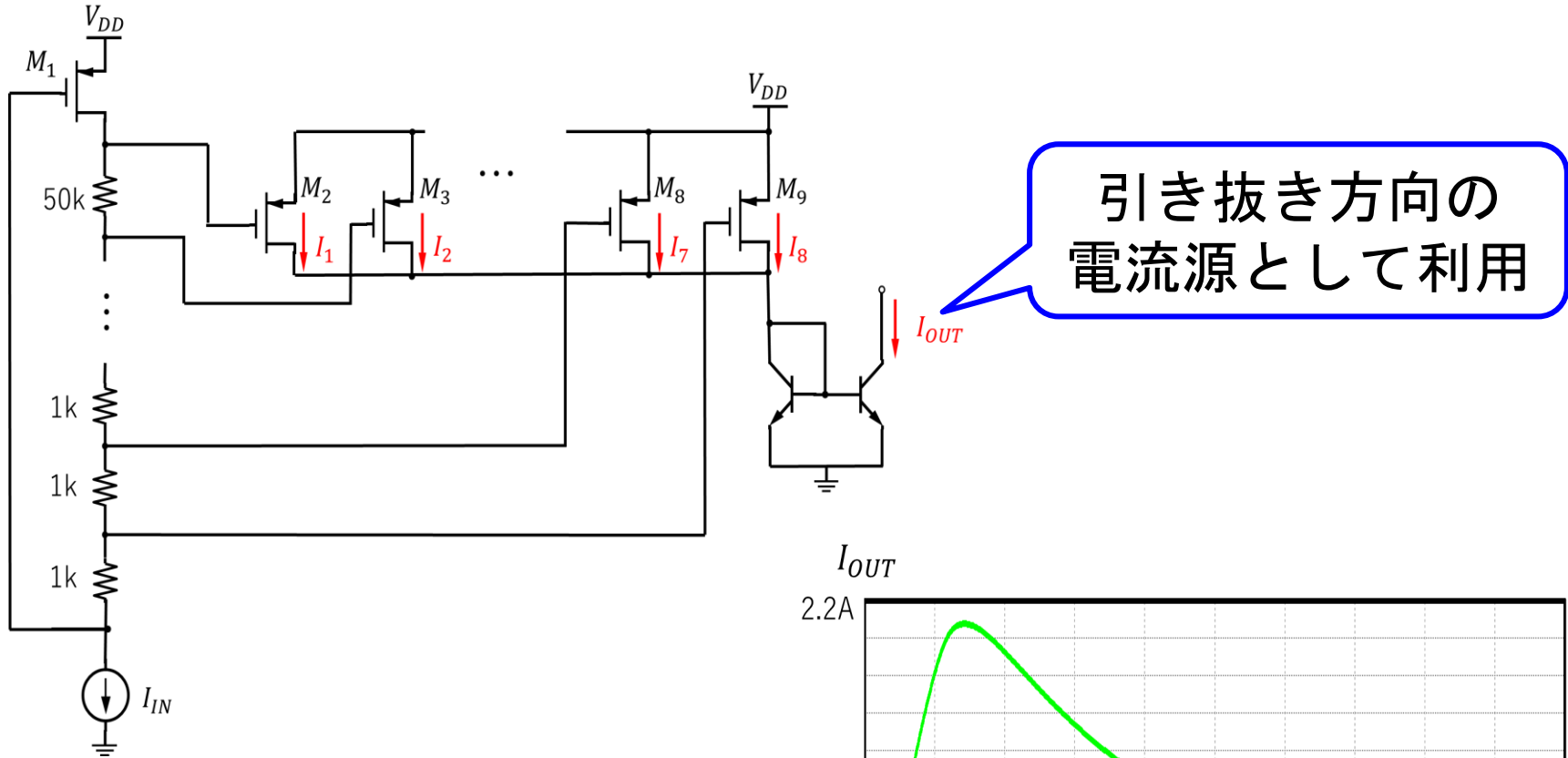
充電方向の
電流源として利用

入力電流 I_{IN} に対して
電流 $I_1 \sim I_8$ がピークを持つ

I_{OUT} は $I_1 \sim I_8$ の和

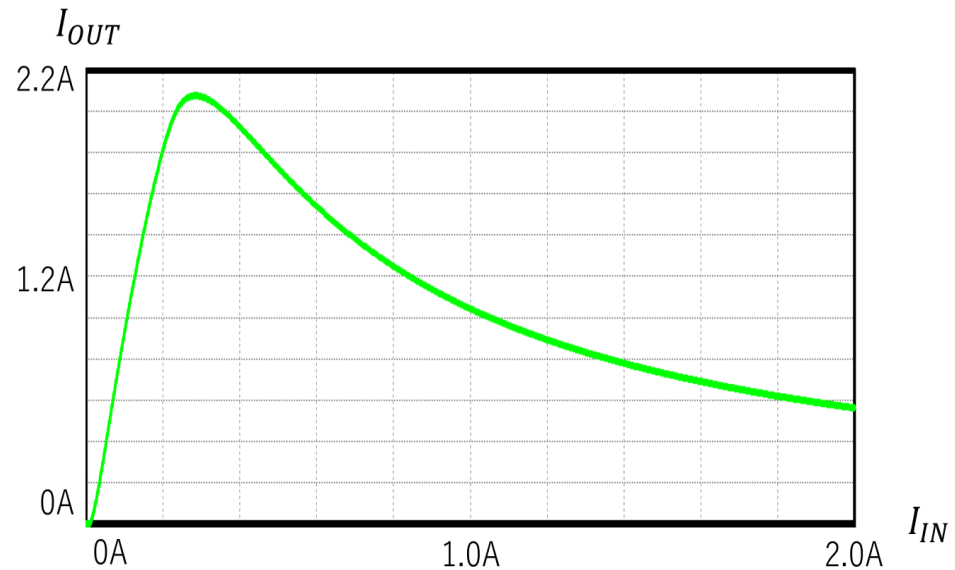


複数ピーク電流ミラー回路(pMOS)



入力電流 I_{IN} に対して
電流 $I_1 \sim I_8$ がピークを持つ

I_{OUT} は $I_1 \sim I_8$ の和

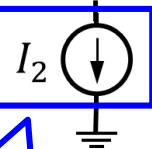
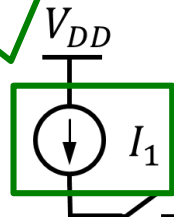


OUTLINE

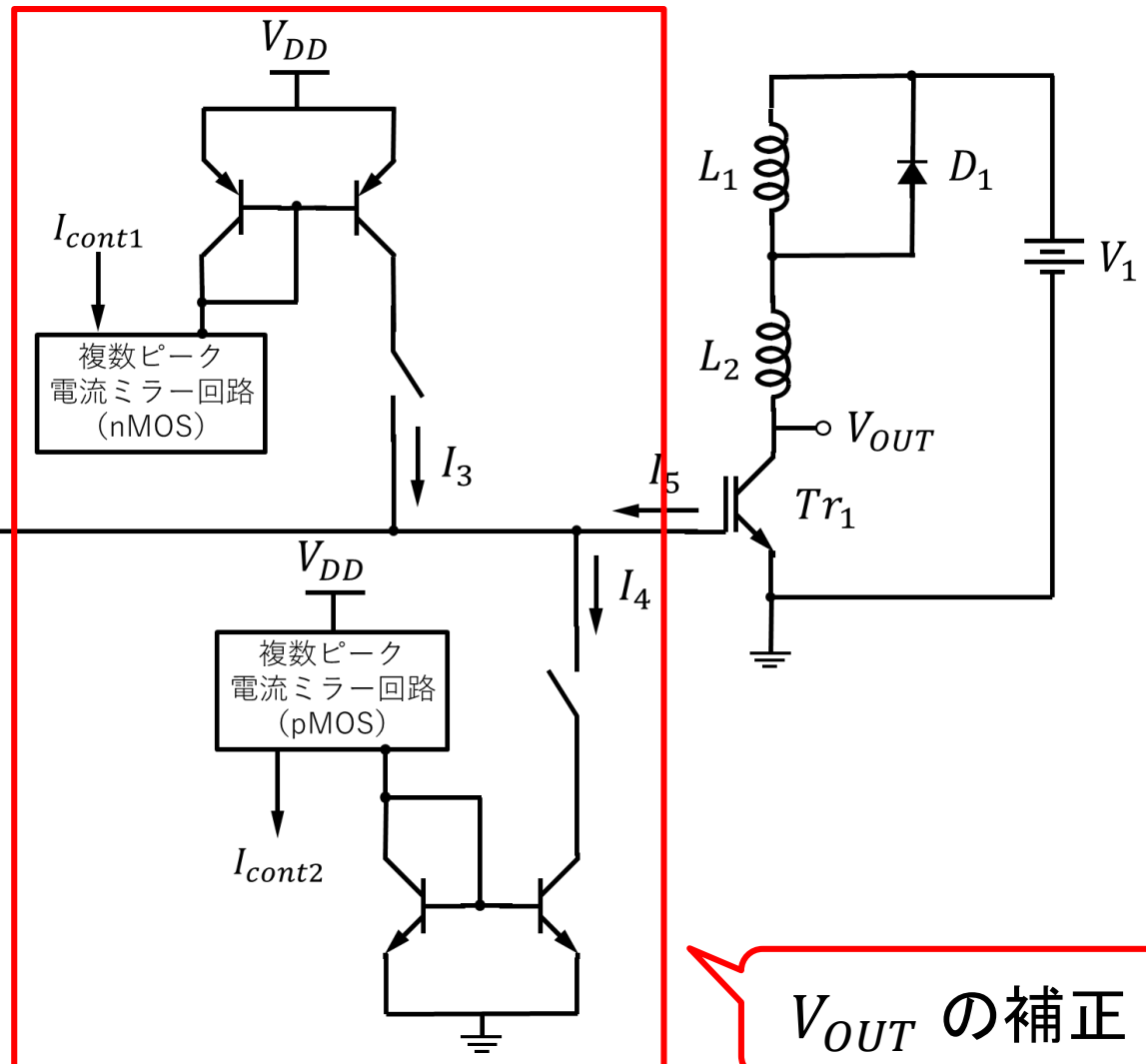
1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

提案回路

$I_1 : 1\text{mA}$,
100 μs で充電

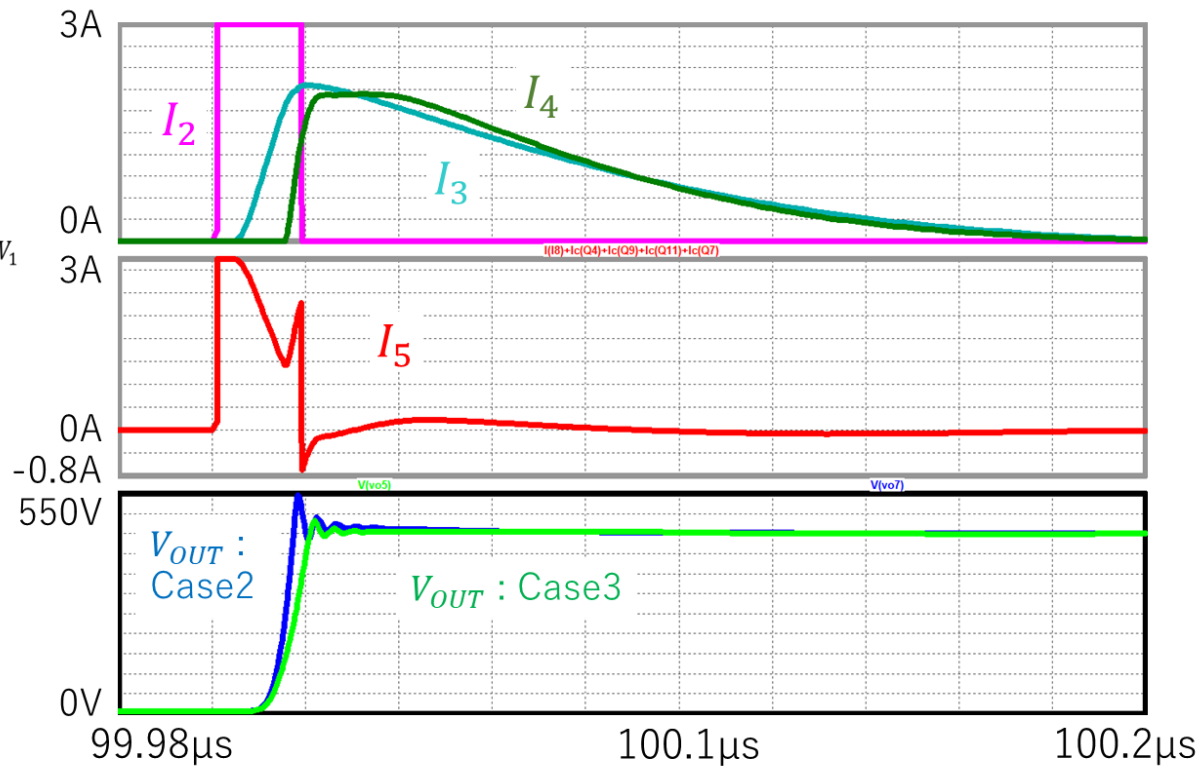
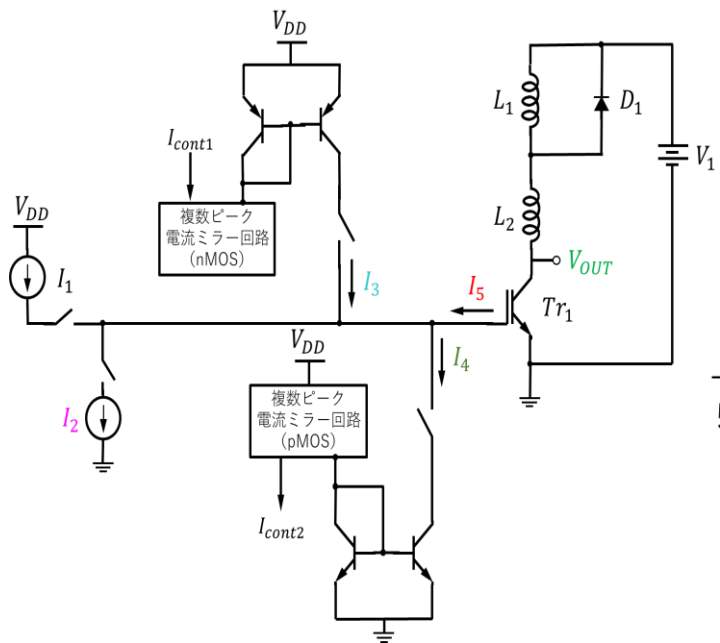


$I_2 : 3\text{A}$, 0.018 μs
で引き抜き
(Case2と同様)



V_{OUT} の補正

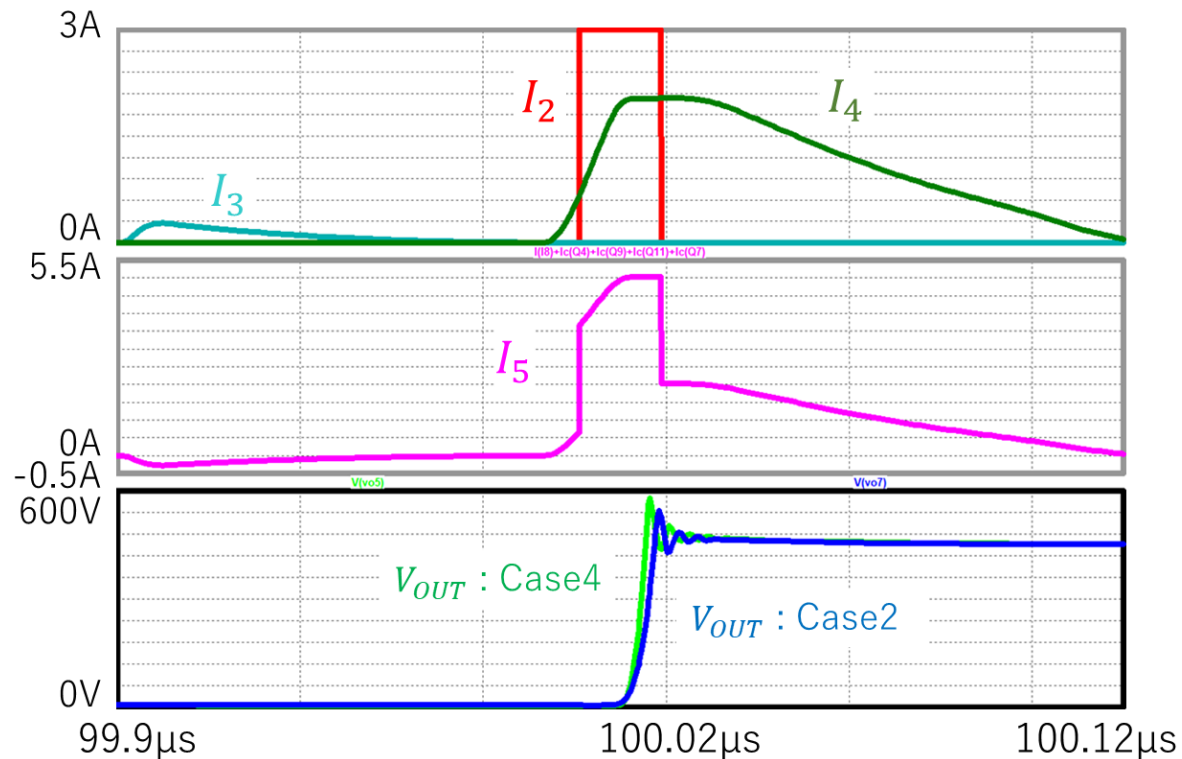
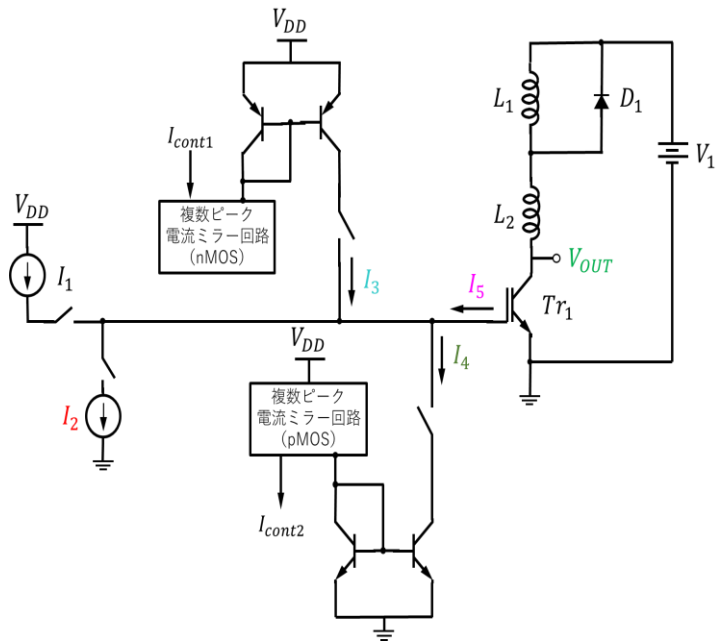
オーバーシュート抑制(Case3)



オーバーシュート : Case2 \rightarrow 95.5V

Case3 \rightarrow 30.9V

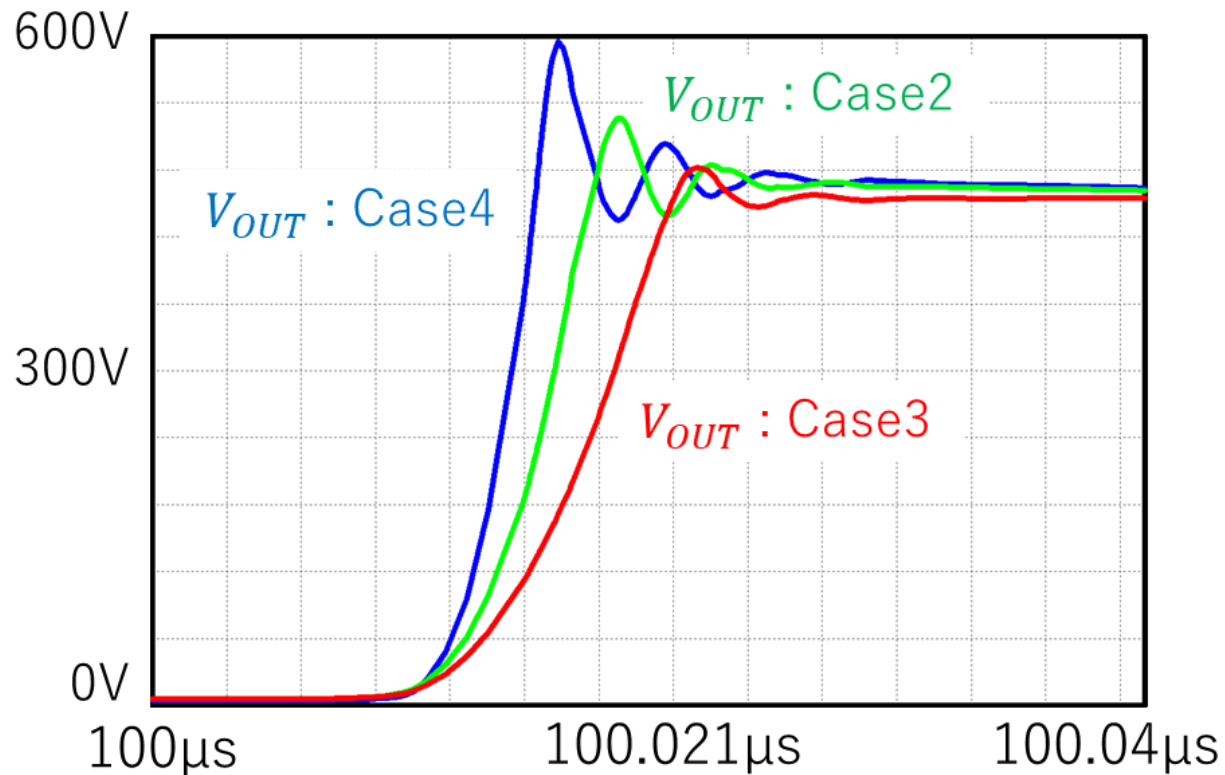
立ち上がり時間短縮(Case4)



オーバーシュート : Case2 \rightarrow 95.5V

Case4 \rightarrow 137.8V

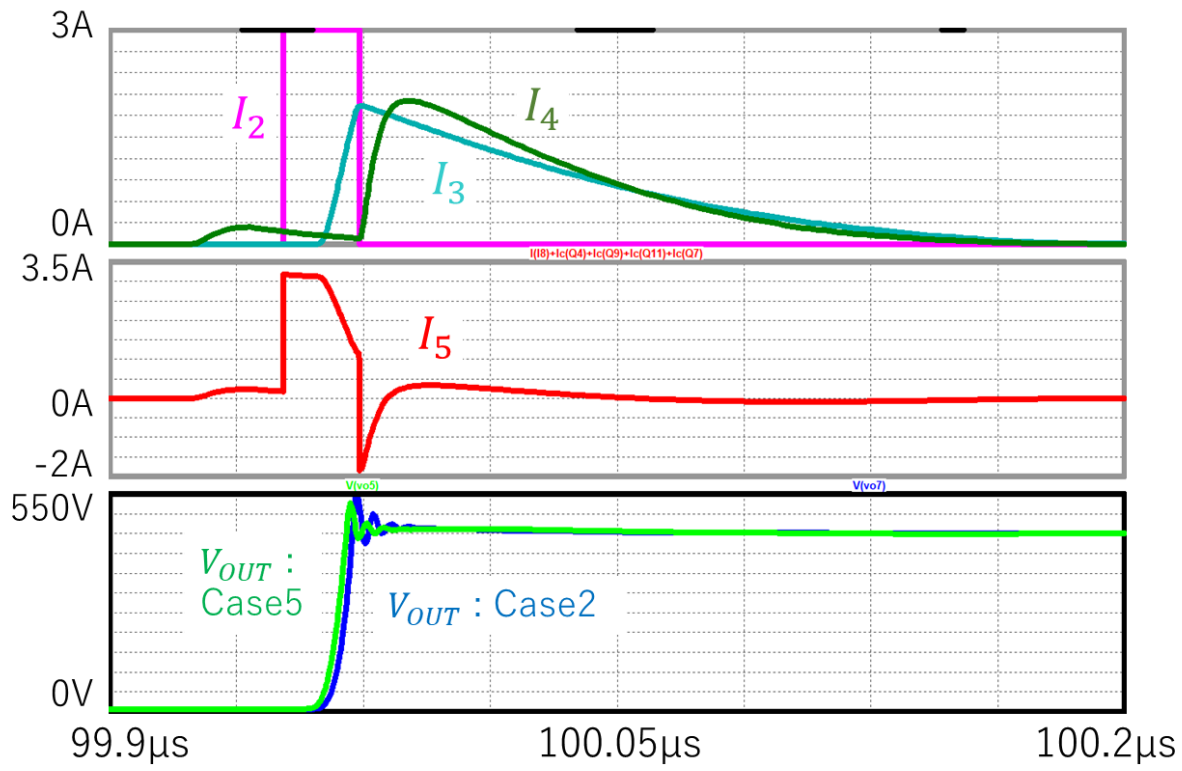
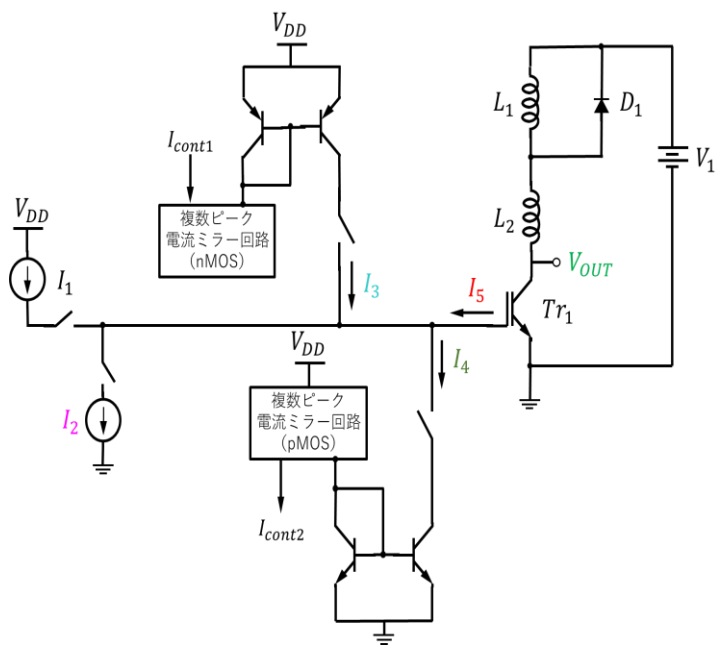
Case2, Case3, Case4の比較



オーバーシュート : Case3 > Case2 > Case4

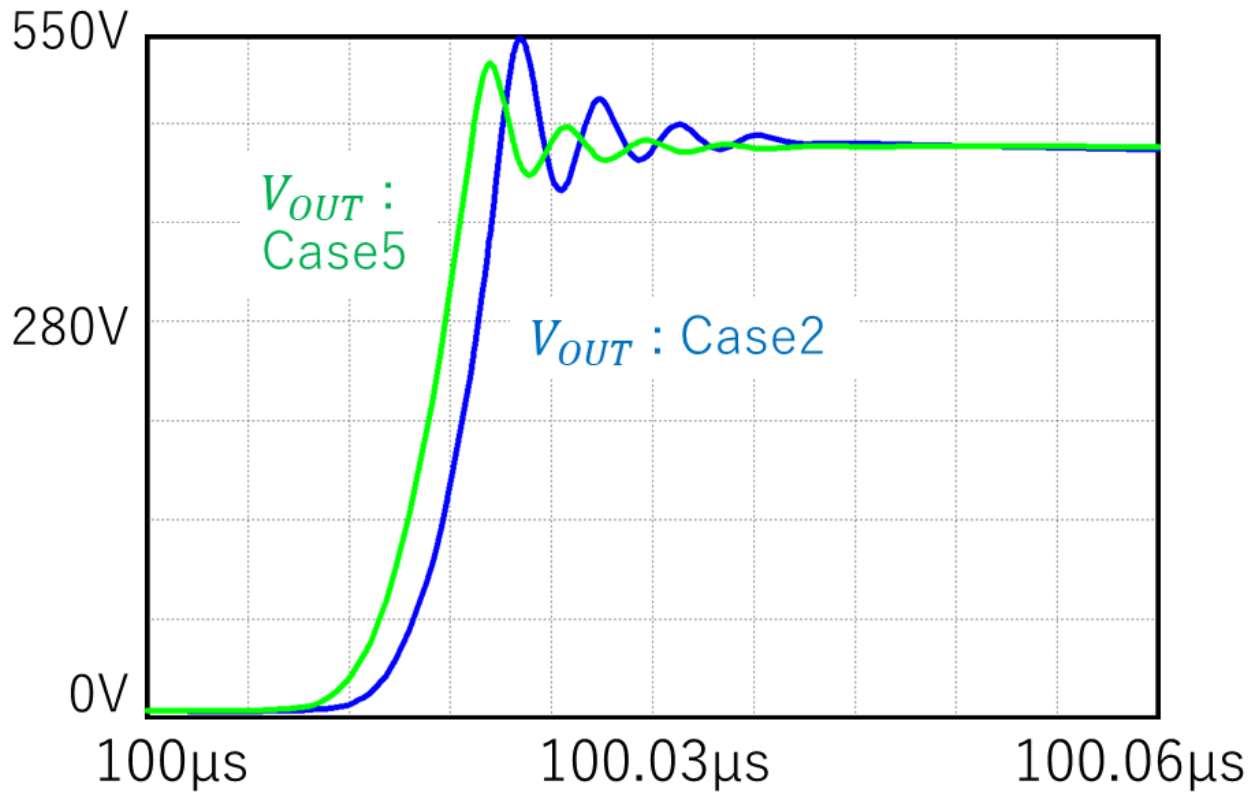
立ち上がり時間 : Case4 > Case2 > Case3

オーバーシュート・立ち上がり時間改善(Case5)



オーバーシュート : Case2 \rightarrow 95.5V
 Case5 \rightarrow 78.2V

Case2, Case5の比較



オーバーシュート・立ち上がり時間共に改善

OUTLINE

1. 研究背景・目標
2. IGBTターンオフ特性の評価回路
3. IGBTの定電流駆動
4. 複数ピーク電流ミラー回路
5. 提案回路のシミュレーション検証
6. まとめと今後の課題

まとめと今後の課題

まとめ

- 微小定電流によってIGBTを駆動することでスイッチング損失を抑制した。
- 複数ピーク電流ミラー回路を用いてIGBTのターンオフ特性の検討をした。
 - ➡ アプリケーションに応じて必要な波形の生成が見込まれる

今後の課題

- オーバーシュートやスイッチング損失の両者を考慮した最適化の検討

使用IGBT

富士電機

品番 : FGW50N65WD (耐压 : 650V)

- Pspice model level,1

■ Maximum Ratings and Characteristics

● Absolute Maximum Ratings (at $T_c=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Items	Symbols	Characteristics	Units	Remarks
Collector-Emitter Voltage	V_{CES}	650	V	
Gate-Emitter Voltage	V_{GES}	± 20	V	$T_p < 1\mu\text{s}$
Transient Gate-Emitter Voltage		± 30		
DC Collector Current	$I_{C@25}$	70	A	$T_c = 25^\circ\text{C}$
	$I_{C@100}$	50	A	$T_c = 100^\circ\text{C}$
Pulsed Collector Current	I_{CP}	200	A	Note *1
Turn-Off Safe Operating Area	-	200	A	$V_{CE} \leq 650\text{V}$ $T_j \leq 175^\circ\text{C}$
Diode Forward Current	$I_{F@25}$	38	A	
	$I_{F@100}$	25	A	
Diode Pulsed Current	I_{FP}	200	A	Note *1
IGBT Max. Power Dissipation	P_{D_IGBT}	330	W	$T_c = 25^\circ\text{C}$
FWD Max. Power Dissipation	P_{D_FWD}	95	W	$T_c = 25^\circ\text{C}$
Operating Junction Temperature	T_j	-40 ~ +175	$^\circ\text{C}$	
Storage Temperature	T_{stg}	-55 ~ +175	$^\circ\text{C}$	

Note *1 : Pulse width limited by T_{jmax} .

電氣的特性

● Electrical characteristics (at $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Description	Symbols	Conditions	Characteristics			Units	
			min.	typ.	max.		
Zero Gate Voltage Collector Current	I_{CES}	$V_{CE} = 650\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
			$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	-	2	mA
Gate-Emitter Leakage Current	I_{GES}	$V_{CE} = 0\text{V}, V_{GE} = \pm 20\text{V}$	-	-	200	nA	
Gate-Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(th)}$	$V_{CE} = 20\text{V}, I_C = 50\text{mA}$	3.0	4.0	5.0	V	
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE} = 15\text{V}, I_C = 50\text{A}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	1.40	1.80	2.20	V
			$T_j = 125^\circ\text{C}$	-	2.05	-	
			$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	2.10	-	
Input Capacitance	C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{V}$	1830	3650	5480	pF	
Output Capacitance	C_{oes}	$V_{GE} = 0\text{V}$	103	105	208		
Reverse Transfer Capacitance	C_{res}	$f = 1\text{MHz}$	40	80	120		
Gate Charge	Q_G	$V_{CC} = 520\text{V}$ $I_C = 50\text{A}$ $V_{GE} = 15\text{V}$	108	215	323	nC	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$T_j = 25^\circ\text{C}, V_{CC} = 400\text{V}$ $I_C = 25\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$ $R_G = 10\Omega, L = 500\mu\text{H}$ Energy loss include "tail" and FWD reverse recovery.	14	27	41	ns	
Rise Time	t_r		16	32	48		
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		120	240	360		
Fall Time	t_f		30	60	90		
Turn-On Energy	E_{on}		0.21	0.42	0.63		
Turn-Off Energy	E_{off}	0.23	0.46	0.69	mJ		
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$T_j = 150^\circ\text{C}, V_{CC} = 400\text{V}$ $I_C = 25\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$ $R_G = 10\Omega, L = 500\mu\text{H}$ Energy loss include "tail" and FWD reverse recovery.	14	27	41	ns	
Rise Time	t_r		16	32	48		
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		133	265	398		
Fall Time	t_f		27	54	81		
Turn-On Energy	E_{on}		0.35	0.70	1.05		
Turn-Off Energy	E_{off}	0.27	0.54	0.81	mJ		
Forward Voltage Drop	V_F	$I_F = 25\text{A}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	1.8	2.5	3.2	V
			$T_j = 125^\circ\text{C}$	-	1.9	-	V
			$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	1.7	-	V
Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$V_{CC} = 400\text{V}, I_F = 25\text{A}$	35	70	105	ns	
Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}	$-di_F/dt = 500\text{A}/\mu\text{s}, T_j = 25^\circ\text{C}$	0.16	0.32	0.48	μC	
Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$V_{CC} = 400\text{V}, I_F = 25\text{A}$	48	95	143	ns	
Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}	$-di_F/dt = 500\text{A}/\mu\text{s}, T_j = 150^\circ\text{C}$	0.44	0.88	1.32	μC	

Q&A

- 電流源で駆動しても損失はゼロにならない。一般的なゲート抵抗を考慮した場合、どれくらい損失があるのか？また、電流源は作るのが難しいので、電流源を使ってでも「これくらい特性がよくなった」という比較・評価が必要。
- 出力波形がRL共振のようにみえるが、評価回路でRはどこに出てくるのか？IGBTに抵抗の要素が含まれているのか？