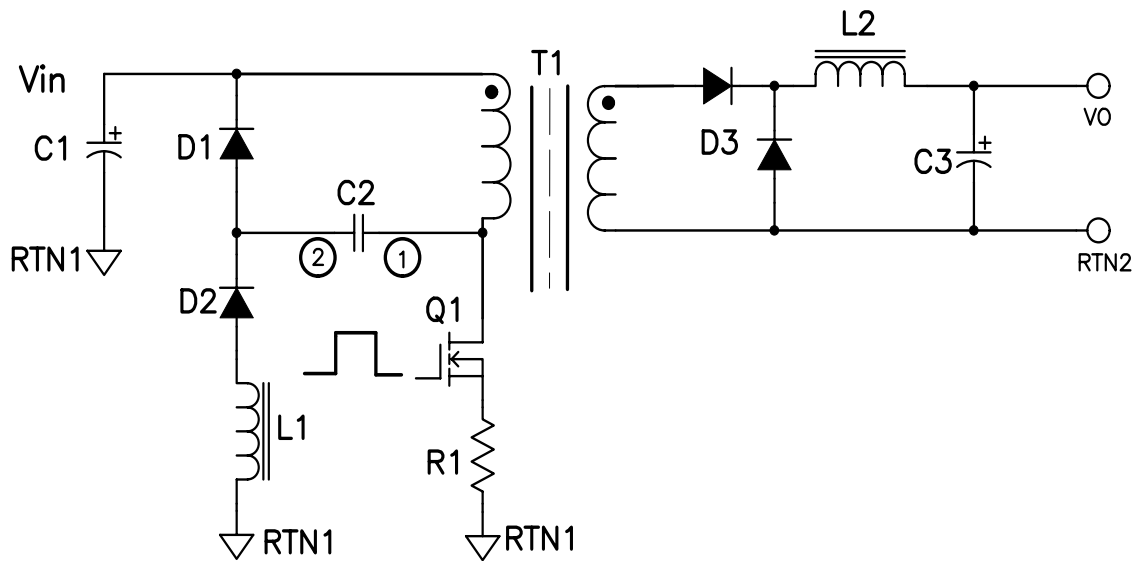


Forward LCD Snubber Working Analysis



电路条件及各零件参数:

1. Input : 230Vac 50Hz, Output : 300W 电源 .
2. C2=2200pF, L1=40 μ H , D1, D2: 1A, 1 kV.
Q1: 11N90 Fairchild (Typical: Ron = 0.75 Ω), R1 = Rsense = 0.1 Ω
T1: Lp = 3.6 mH (normal) , Lk = 40 μ H (max)

以往 LCD Clamp 电路 工作状态都会被这么认为:

1. 在 Q1 Turn Off 时,变压器的漏感电流流经 C2, D1 对 C2 进行充电.
2. 在 Q1 再次 Turn On 时, C2 上的能量将流经 MOS(Q1), 地, D2, L1 , 并将能量转移到 L1 .
3. 当 Q1 再次 Turn Off 时, 重复 1 动作, 同时 L1 将刚才得到的能量由 D1, Bulk Cap , 地 , D2, L1 支路将能量回送至 Bulk Cap (C1) .
4. 以后将以 2, 3 , 周期性工作 .

具体分析 LCD Clamp 电路的工作状态

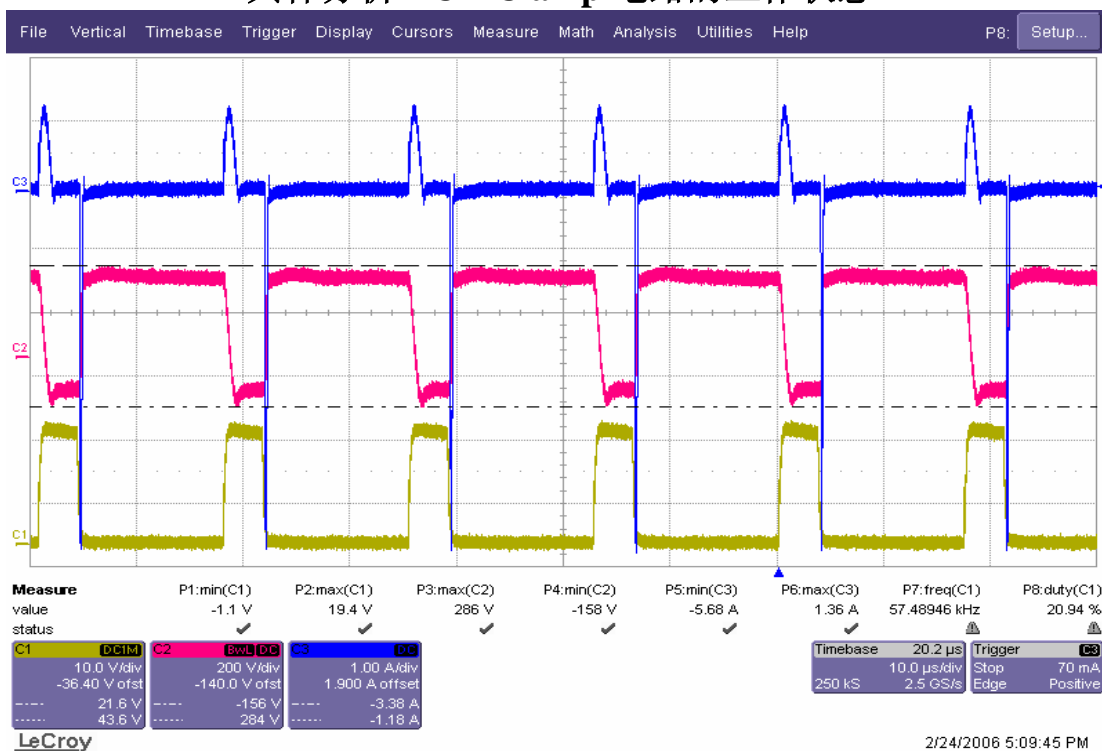


图 1 (CH1: V_{g-s}, CH2: V_{C2①-②}, CH3: I_{C2})

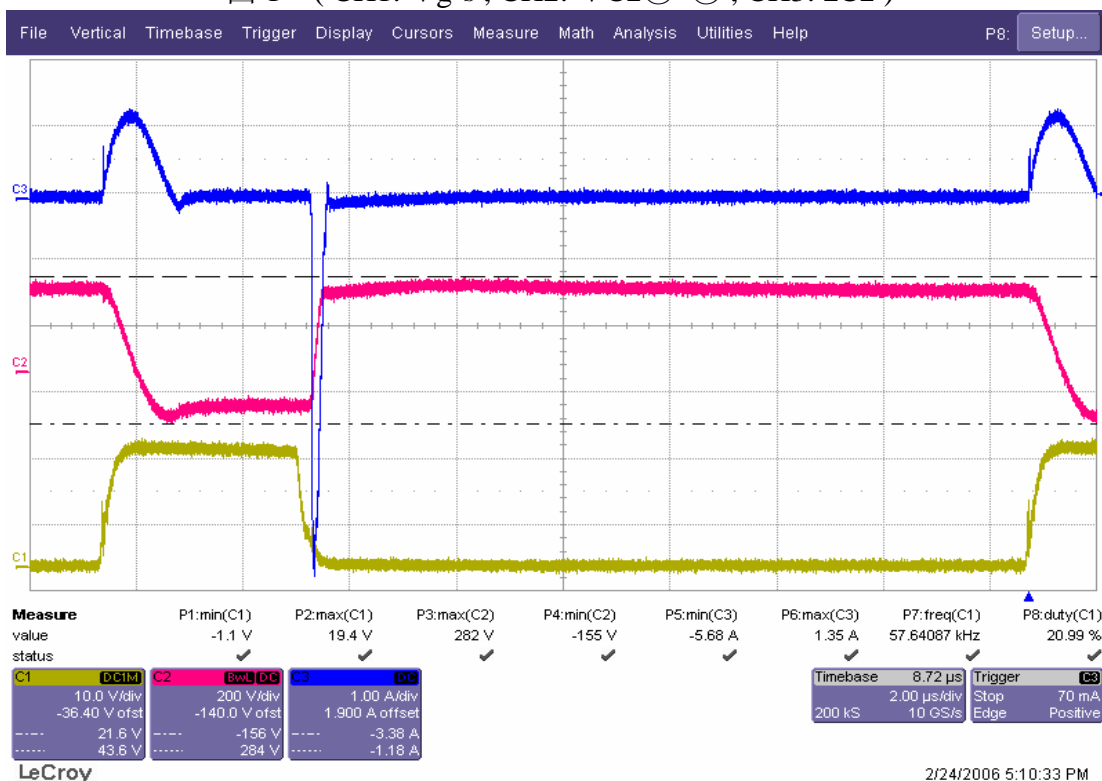


图 2(图 1 的展开图) (CH1: V_{g-s}, CH2: V_{C2①-②}, CH3: I_{C2})

由图 1、图 2 可以得出在 Q1 Toff 时，确实有漏感电流流经 C2，并对 C2 进行充电，实现能量暂存，在 Q1 再次 Ton 时，C2 将放电，但最终仍然有一个电位 (-155V) 加在 C2 的两端，也就是说仍然还有部分能量储存在 C2，只是电位的方向发生改变。



图 3 (CH1: V_{g-s} , CH2: V_{L1} , CH3: I_{L1})

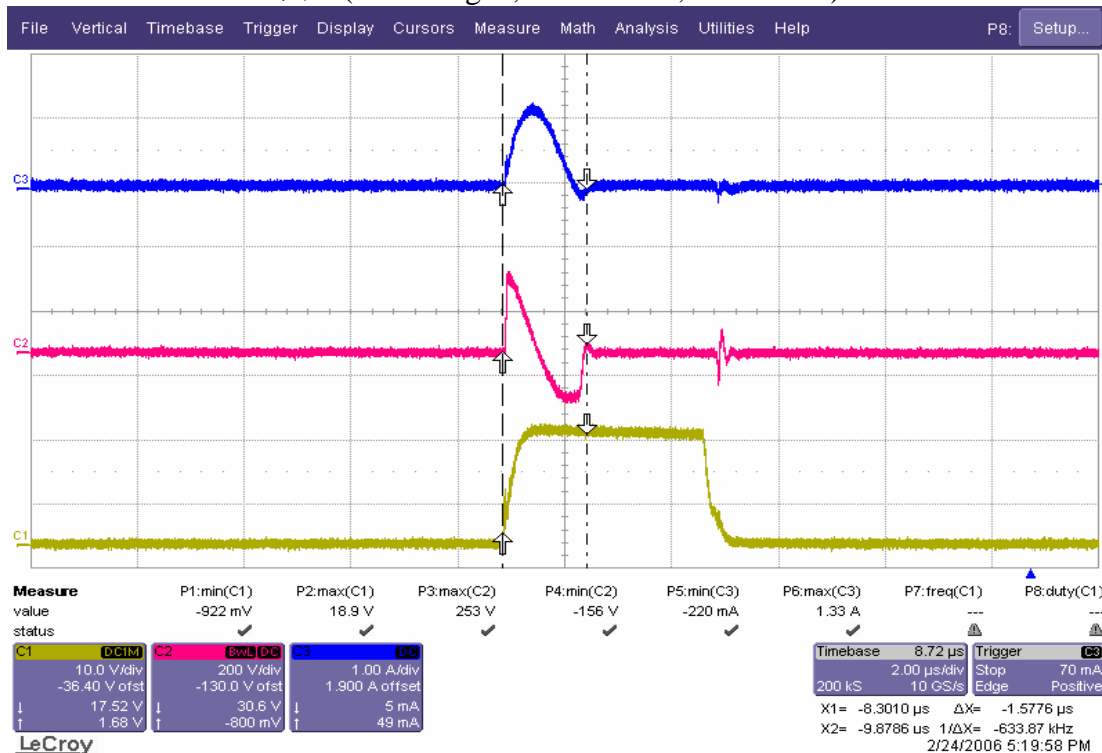


图 4(图 3 的展开图) (CH1: V_{g-s} , CH2: V_{L1} , CH3: I_{L1})

由图 3. 图 4. 可以得出在 $Q1$ T_{on} 时, 电感 $L1$ 两端电压发生突变, 并有充放电现象发生, 但在 $Q1$ 还在 T_{on} 期间时, $L1$ 的电流就已经达到 $0A$, 且电位也为 $0V$, 所以可以说在 $Q1$ T_{on} 前电感已没有储能, 在整个过程中它只发挥能量转移作用。

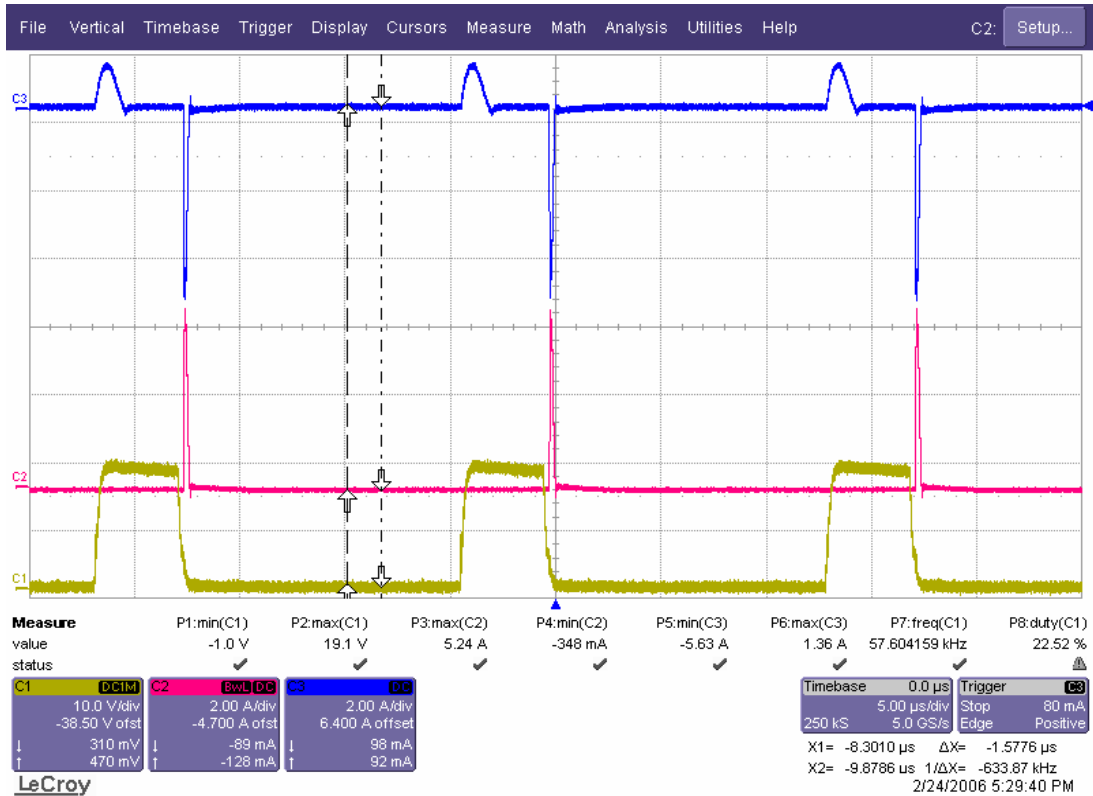


图 5 (CH1: V_{g-s} , CH2: I_{D1} , CH3: I_{L1})

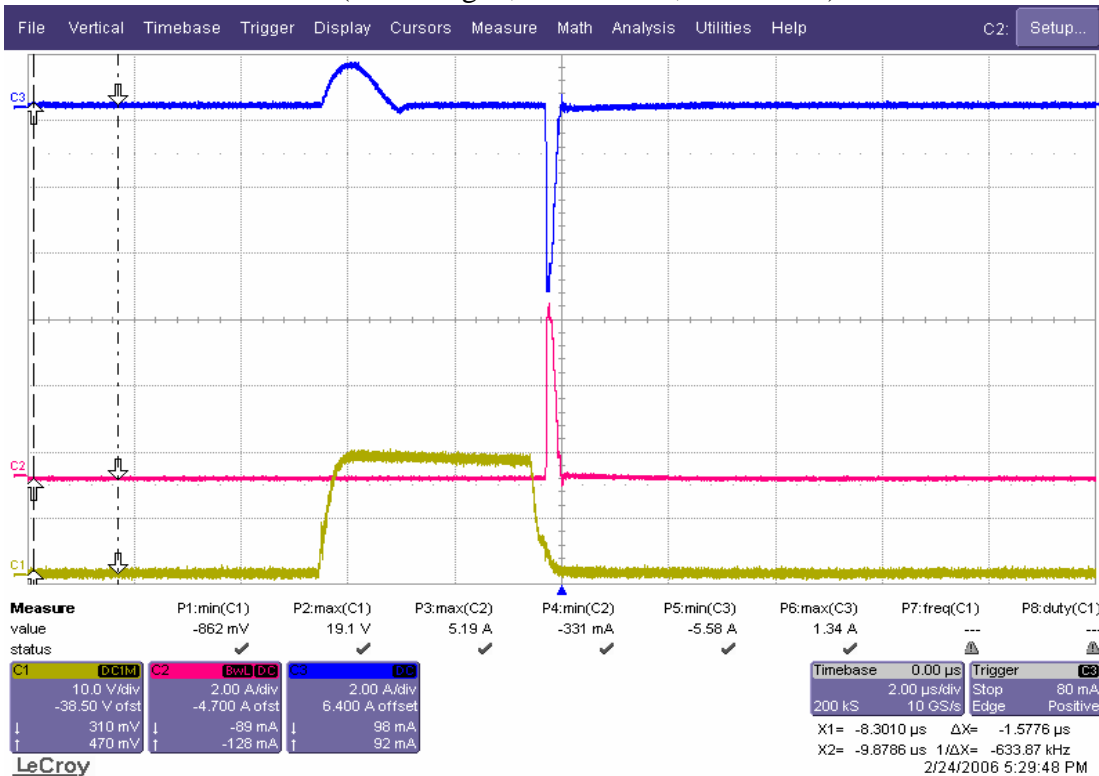


图 6 (图 5 的展开图) (CH1: V_{g-s} , CH2: I_{D1} , CH3: I_{C2})

由图 5. 图 6. 可以得出在 $Q1$ T_{on} 时, 漏感电流流经 $C2$, 对 $C2$ 进行充电, 实现能量暂存, 此时流过 $D1$ 的电流正好能够得到: $I_{C2}(5.58) \approx I_{D1}(5.19)$, 这可再次证明在此期间 $L1$ 没有电流流出并经过 $D1$ 回至 $C2$, 即 $L1$ 关没有在 $Q1$ T_{off} 时将能量回送 $C2$. (因为此时它已没有储能, 前面已得证)

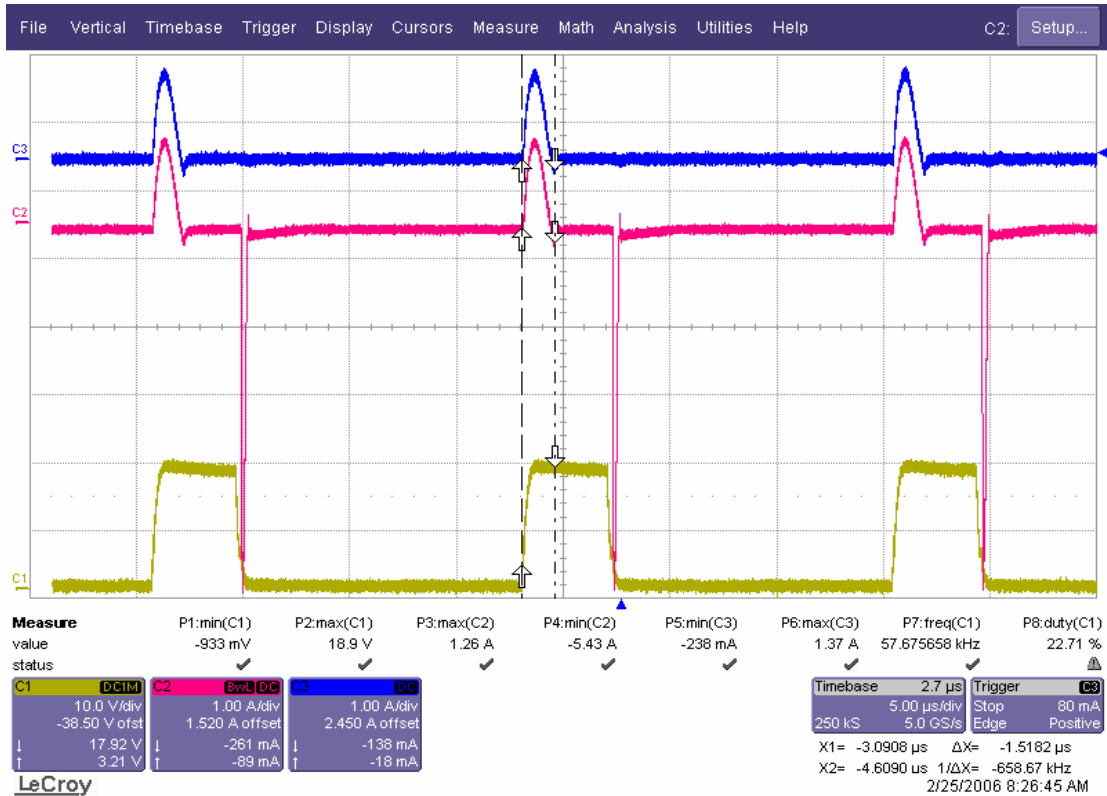


图 7 (CH1: V_{g-s} , CH2: I_{C2} , CH3: I_{L1})

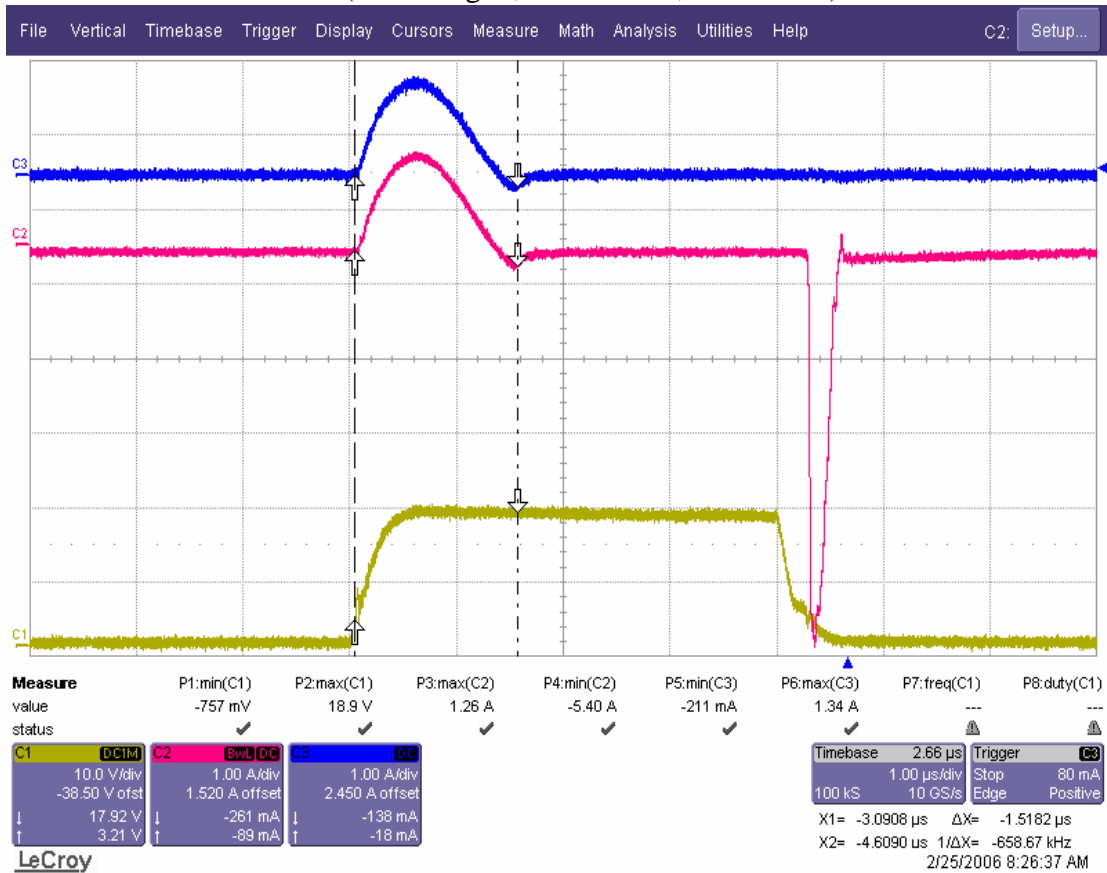


图 8(图 7 的展开图) (CH1: V_{g-s} , CH2: I_{C2} , CH3: I_{L1})

由图 7. 图 8. 可以得出在 Q1 Ton 时, C2 经 Q1, 地, D2, L1 进行放电, 且此时有: $I_{C2} = I_{L1}$, 但最终 $I_{L1} = 0A$ (即没有剩余的能量储存在 L1).

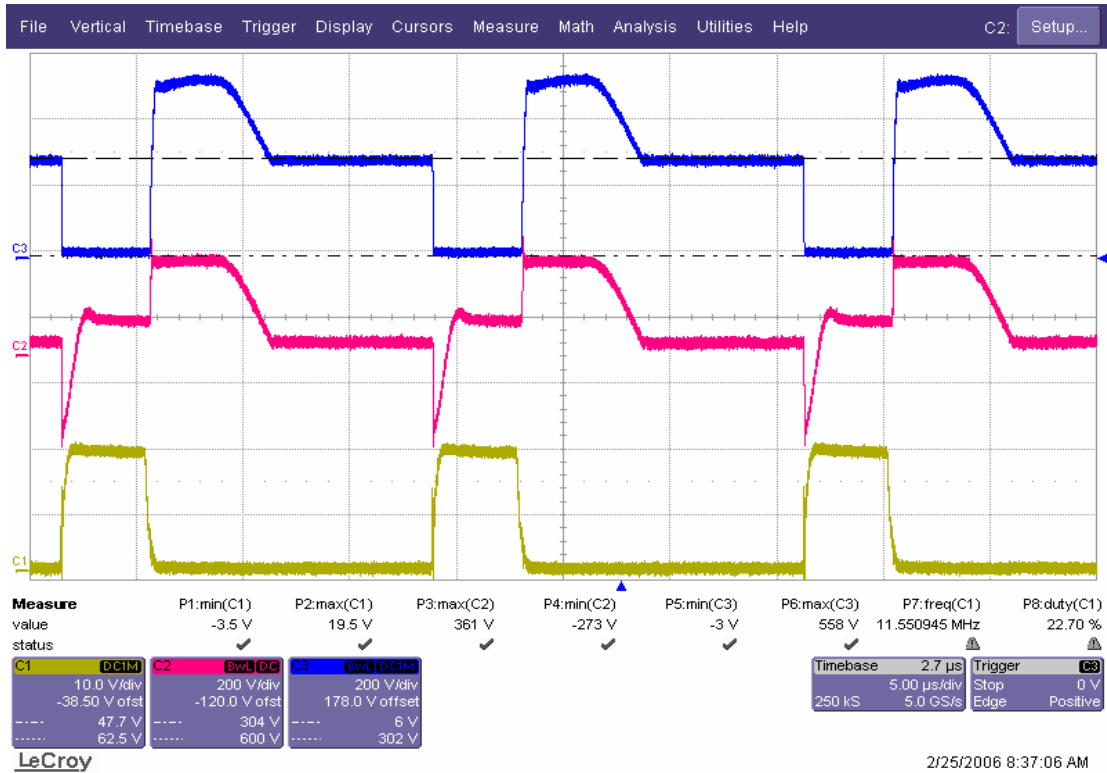


图 9 (CH1: V_{g-s} , CH2: $VC2②-Ground$, CH3: $VC2①-Ground$)

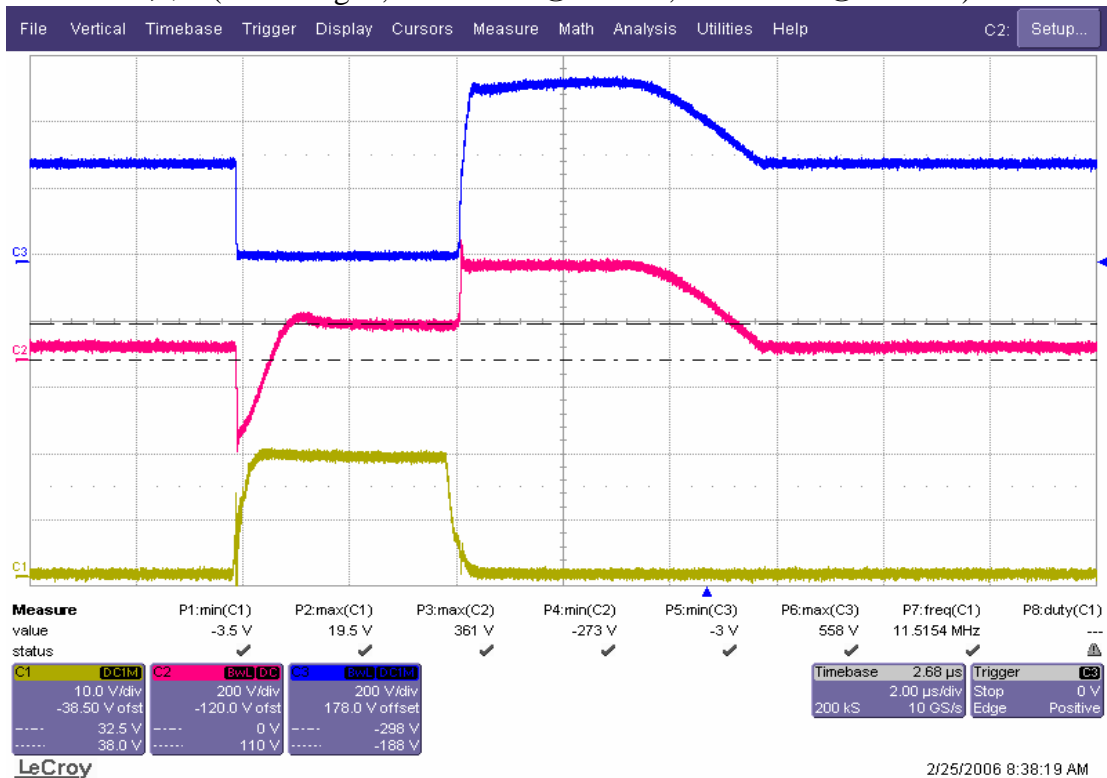


图 10(图 9 的展开图) (CH1: V_{g-s} , CH2: $VC2②-Ground$, CH3: $VC2①-Ground$)
 由图 9. 图 10. 可以得出 Q1 Toff 时, $VC2①-Ground$ 会很快的升上去, 同时 $VC2②-Ground$ 因 $VC2①-Ground$ 的变化也会瞬间升直至达到 $V_{buk}(300V)$, 然后实现对 C2 的充电并储能, 在 Q1 Ton 时 C2 两端的电位也有同时有个突变, 以实现电容两端电位差不突变, 但在 Q1 Ton 后阶段, 仍有 $VC2②-① \approx 150V$, 即 C2 仍有储能: $1/2 C2 * V_{c2}^2$.

结论：由以上分析可得，现应用的 LCD Clamp 电路工作原理具体如下：

1. 当 Q1 第一次 Turn Off 时,变压器的漏感电流流经 C2, D1 对 C2 从初始状态进行充电.
2. 当 Q1 再次 Turn On 时, C2 放电电流流经 MOS(Q1), 地, D2, L1 ,并与 L1 发生谐振, 将部分能量($1/2C_2(U_{c始}^2 - U_{c终}^2)$) 在此其中 $U_{c始}=250V$, $U_{c终}=110V$) 消耗在 MOSFET 与采样电阻上, 并保留另一部分能量($1/2C_2 U_{c终}^2$), 也就是说此过程中 C2 的能量并不是完全放完, L1 也不存储能量(因其在 T_{on} 时 I_L 就已经为零).
3. 当 Q1 再次 Turn Off 时, 重复 1 动作, 但此时 C 的能量是由 2 中剩下的能量开始上充, 电容两端电压同时发生突变, 且会发生谐振, 其中过程是 C2 与 L1 的谐振 .
4. 以后将以 2, 3, Cycle 性工作 .

开关频率: $F=1.72/RC=1.72/(1.69k*15*10^{-9})=67.8\text{ kHz}$

开关周期: $T=1/F=14.74\text{ }\mu\text{S}$ 测试得 $T=15\mu\text{S}$

$T_{on(max)}=40\%*15=6\text{ }\mu\text{S}$ 实际 $T_{on}=4\text{ }\mu\text{S}$

L1 与 C2 的谐振频率: $T=2\sqrt{LC}=1.863\mu\text{S} < T_{on}$

计算验证:

先由测试得到一些参数.

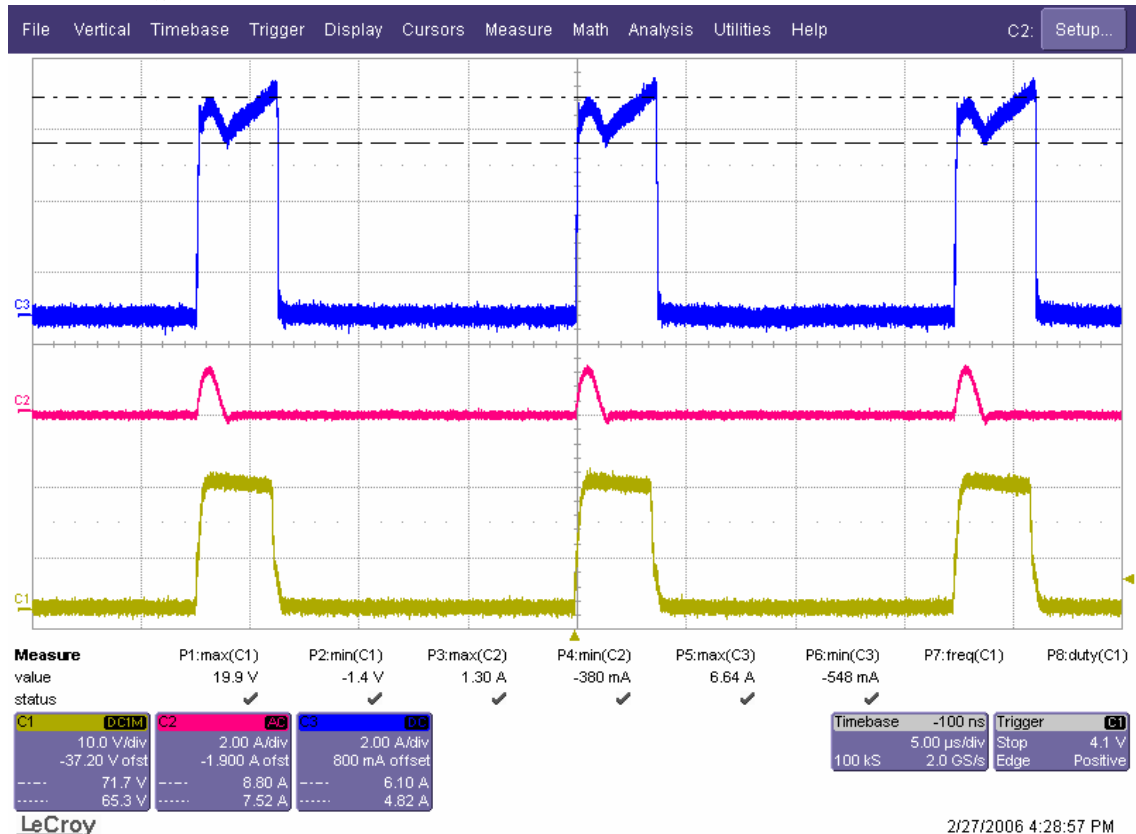


图 11 (CH1: V_{g-s} , CH2: I_{C2} , CH3: I_{d-s})

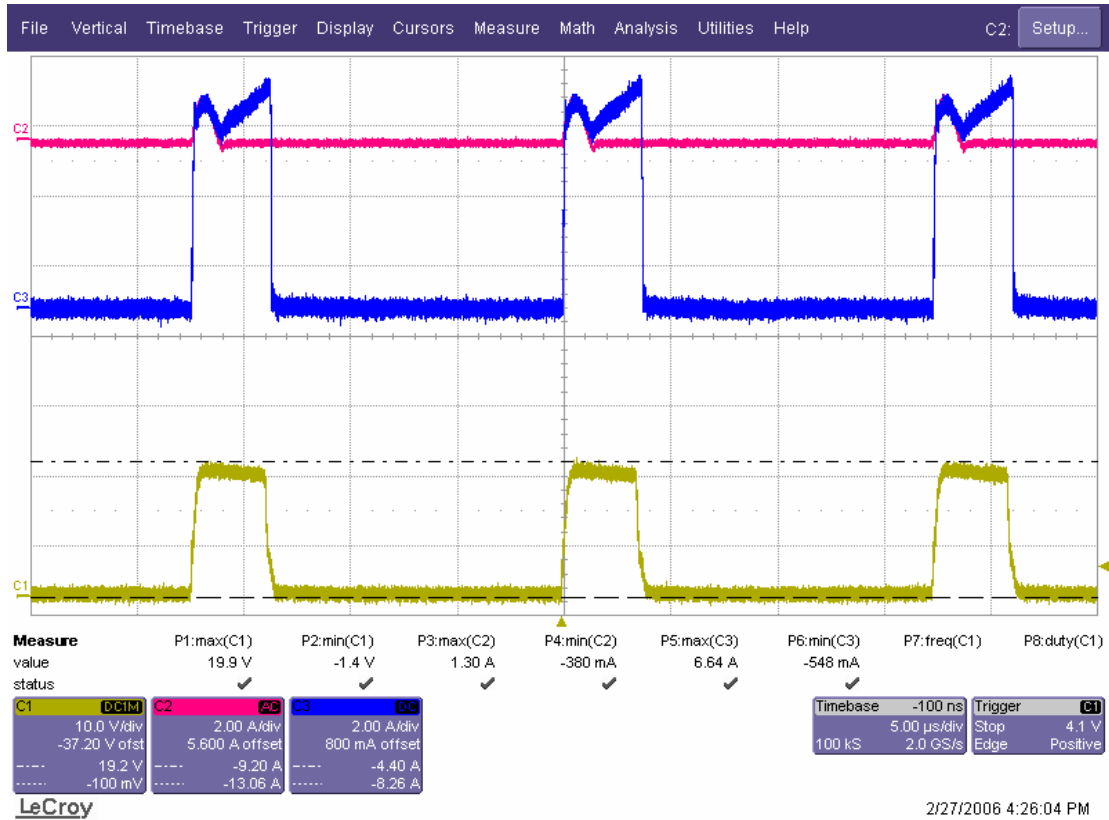


图 12 (CH1: V_{g-s} , CH2: I_{C2} , CH3: I_{d-s})

对此图 11 可知, I_{d-s} 刚开通时的那个半正弦电流是由 C2 放电引起的,其并没有经过变压器

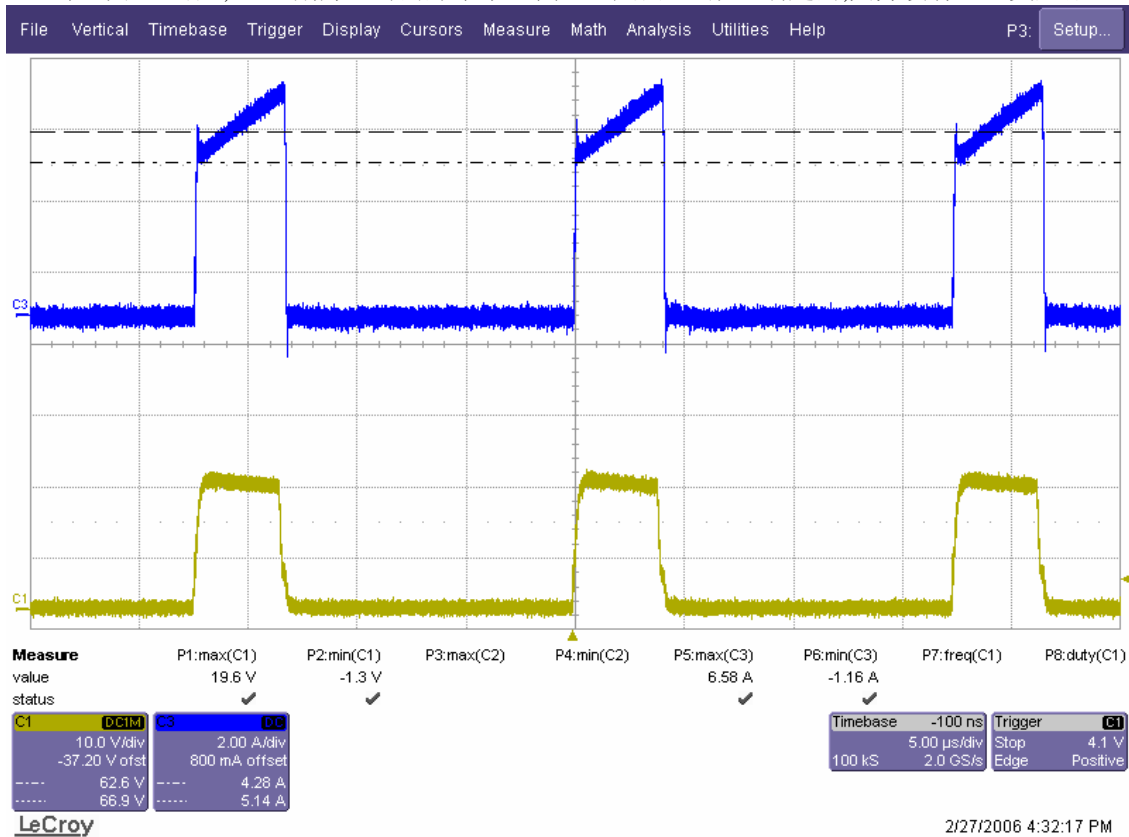


图 13 (CH1: V_{g-s} , CH3: I_{d-s})

此图为去除 LCD Snubber 测得的 I_{d-s} 波形,在此可以看出 I_{d-s} 是线性增长的, 且是 CCM 模式.

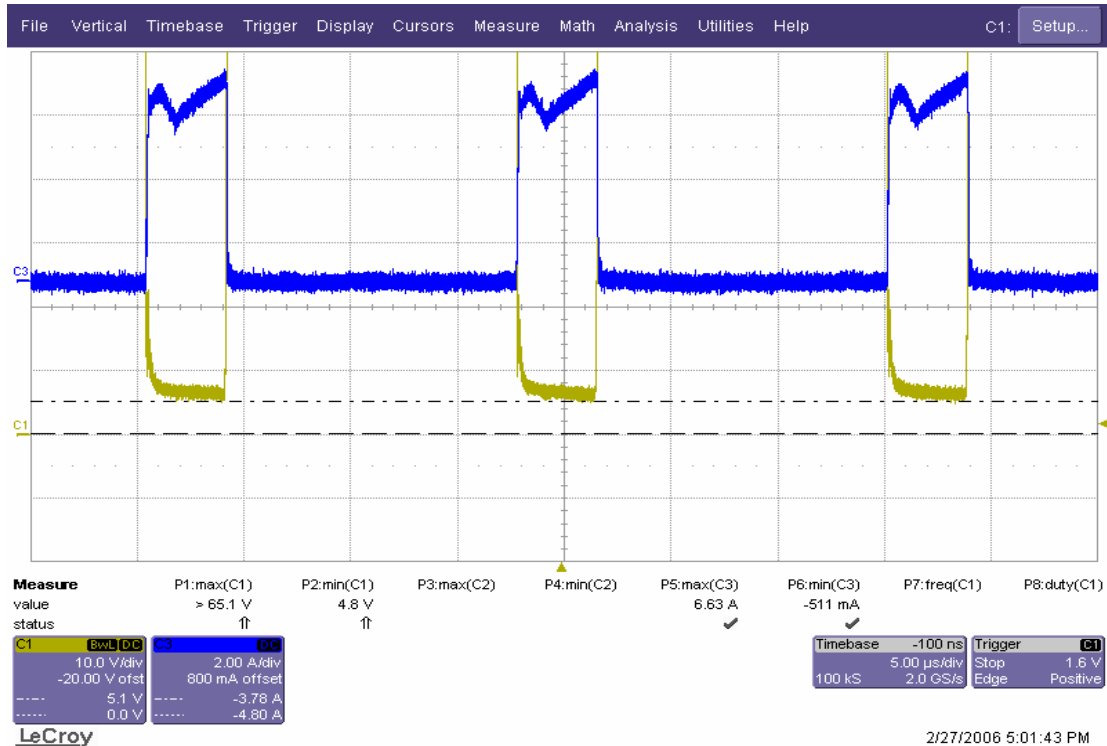


图 14 (CH1: V_{d-s} , CH3: I_{d-s})

由以波形得到: $T = 1/57.45\text{kHz} = 17.4 \mu\text{S}$, $T_{on} \approx T \cdot D = 17.4 \cdot 21\% = 3.655 \mu\text{S}$,
 $I_p = 4.28\text{A Min} \sim 6.6\text{A Max} = 4.28 + 0.635t \ (0 < t < T_{on} \ \mu\text{S})$
 $R_{on} = 4.8\text{V} / 6.6\text{A} = 0.73 \ \Omega$. $R_{sense} = 0.1 \ \Omega$

另已知: $L_1 = 40 \ \mu\text{H}$ (Max), $L_k = 40 \ \mu\text{H}$ (变压器漏感), $C_2 = 2200\text{pF}$.

L_1 与 C_2 的谐振频率: $F = 1 / 2 \sqrt{LC} = 536.8 \ \text{kHz}$, $\omega_0 = 2 \pi \cdot F = 3.37 \cdot 10^6$

实际角频率: $\omega = 2 \pi \cdot F_{\text{实}} = 2 \pi / 3.04 \ \mu\text{S} = 2.07 \cdot 10^6$

实际开关频率: $f_s = 57.5 \ \text{kHz}$

近似计算:

变压器漏感能量:

$$P_k = \int 1/2 \cdot L_k \cdot I_{d-s}^2 dt \cdot f_s = 1/2 \cdot 40\mu\text{H} \cdot (6.6^2 - 4.28^2) \cdot f_s = 2.88\text{W}.$$

(此时间段为 MOS 的 $f_s = 57.5 \ \text{kHz}$, 并且选择 $L_k = 40 \ \mu\text{H}$)

C_2 前后传递的能量:

$$P_{C2} = 1/2 C (U_{\text{始}}^2 - U_{\text{终}}^2) \cdot f_s \\ = 1/2 \cdot 2200 \cdot 10^{-12} \cdot (235^2 - 105^2) \cdot f_s = 2.8 \ \text{W}$$

结论: 由此得到 $P_k \approx P_{C2}$, 而在 LC 谐振时并没有把能量回传 Bulk Cap, 且谐振完后(仍在 T_{on} 期间) L_1 的电流已经为零, 所以 LCD Snubber 并没有真正的实现能量回收, 只是在得用 LC 的谐振使能量最终消耗在 MOS 管、Sense 电阻等谐振回路阻抗上, 以此实现对电压的箝位.