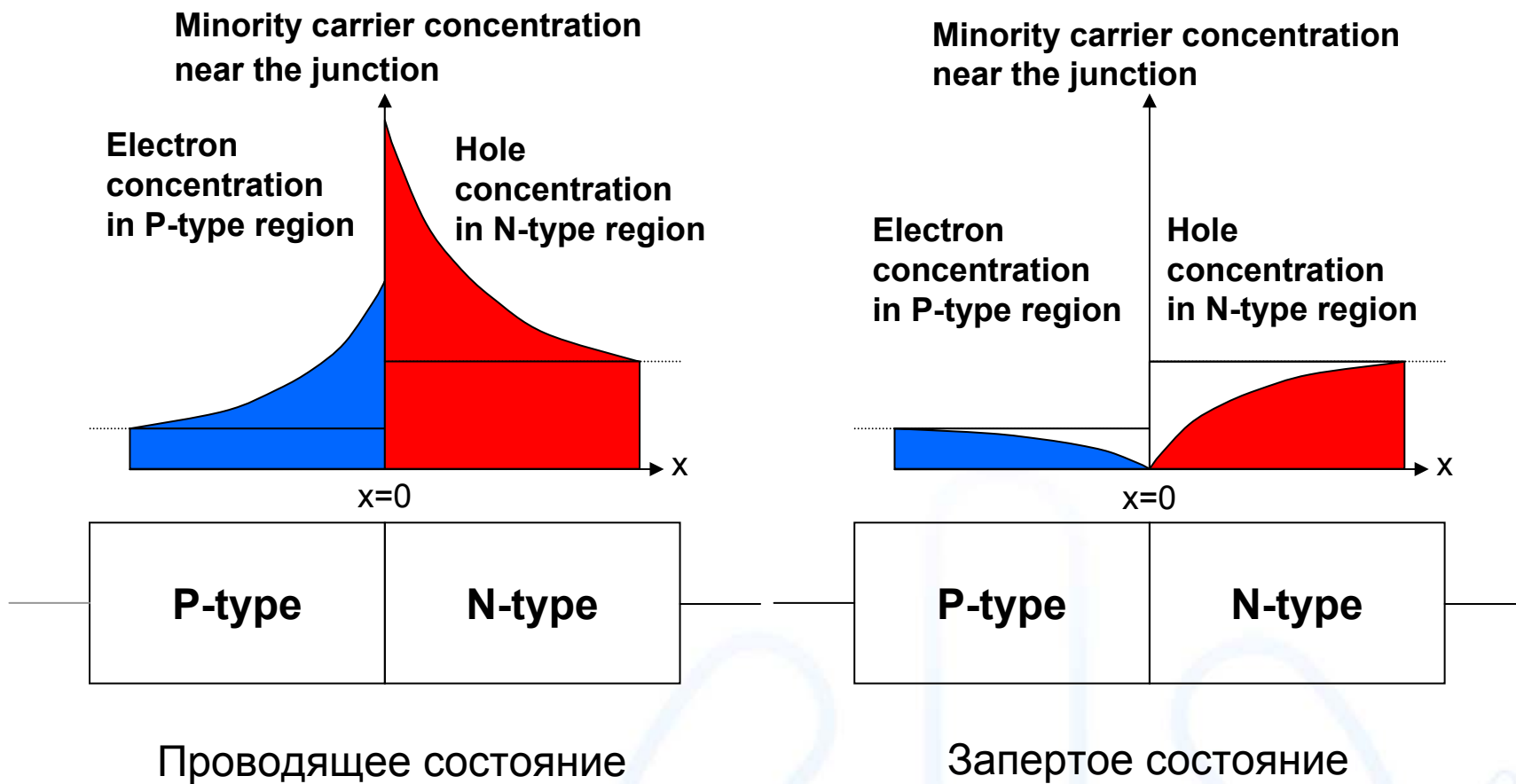


# Время восстановления диода и влияние этого эффекта на динамические потери

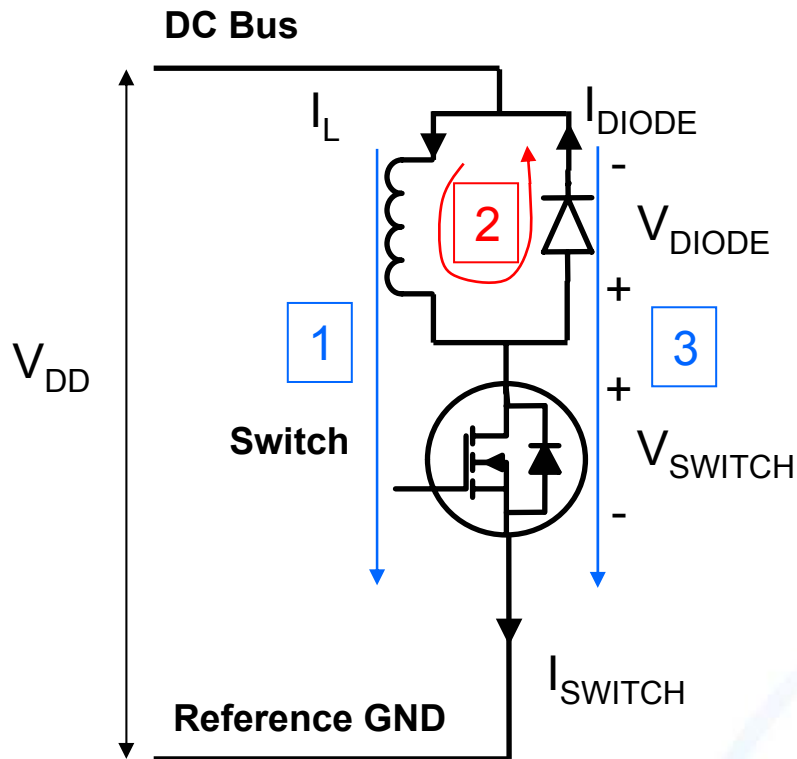
Peter Haaf, Senior Field Applications Engineer  
Jon Harper, Market Development Manager  
November 2006

1. Определение
2. Математическая оценка
3. Динамические потери от напряжения
4. Динамические потери от тока
5. Динамические потери в прямоходовом преобразователе (косой полумост) с жесткой коммутацией при использовании разной технологии изготовления диодов
6. Влияние параллельной емкости на динамические потери
7. Динамические потери от времени нарастания и спада
8. Заключение

# Распределение заряда диода в проводящем и непроводящем состоянии



## Поведение диода при жесткой коммутации



Step 1: Транзистор включен  
ток растет

Step 2: Транзистор выключен  
ток течет по контуру

Step 3: Транзистор снова включен,  
диод восстанавливается,  
ток продолжает расти

- Определение мощности потерь

$$P = 1/T * \int U(t) * I(t) dt$$

$$= \text{mean} ( U(t) * I(t) )$$

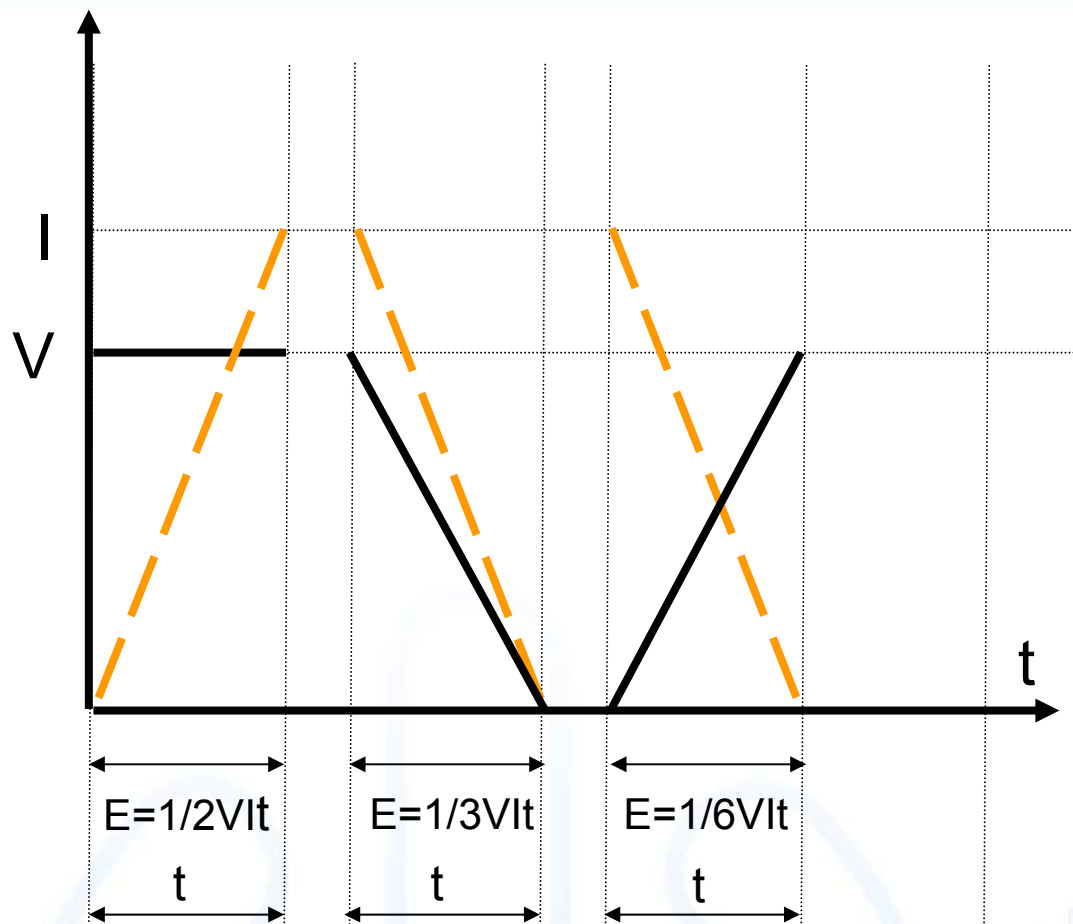
$$E = P * t$$

$$= \int U(t) * I(t) dt$$

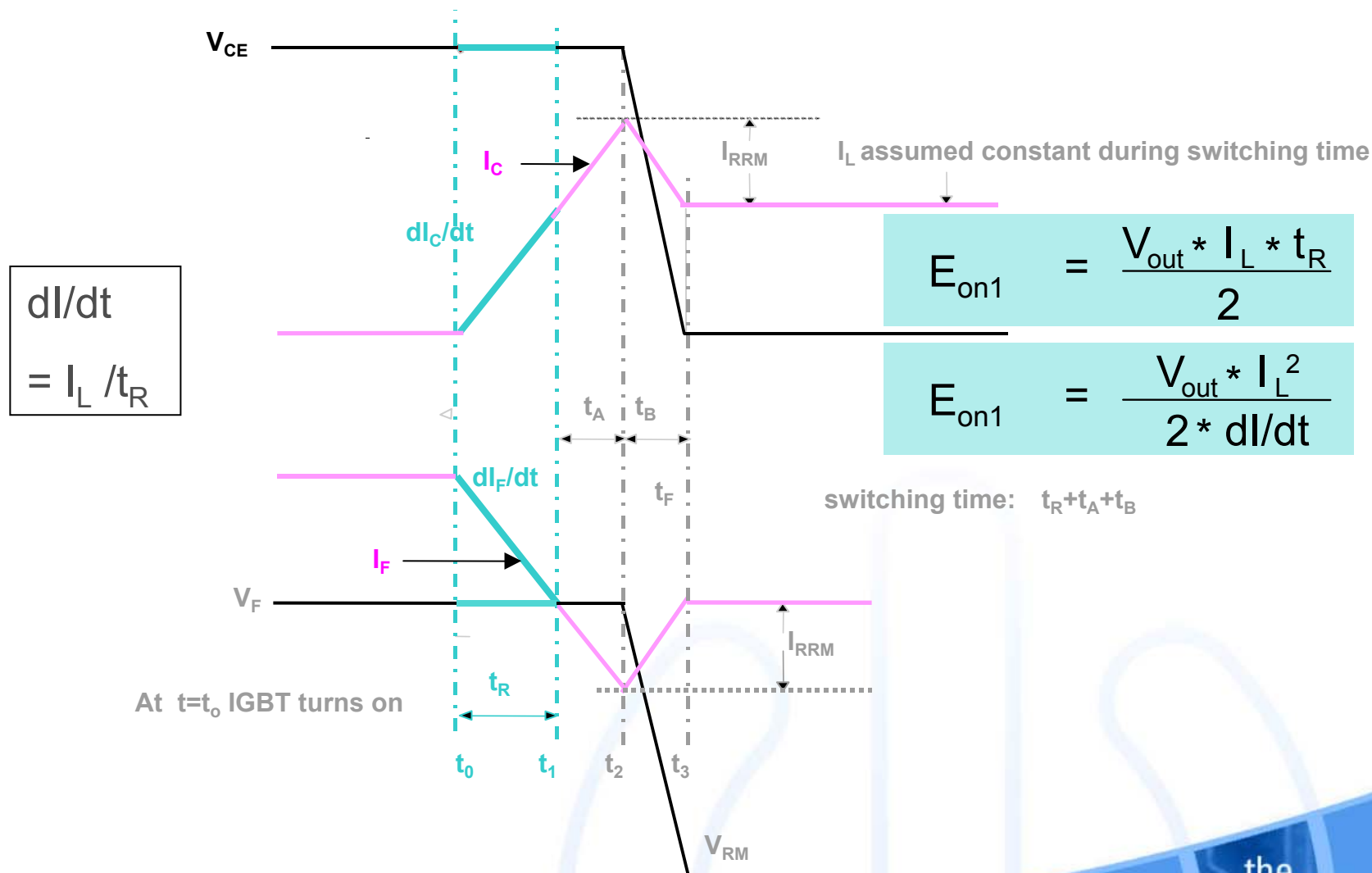
$$= \text{area} ( U(t) * I(t) )$$

$$P_{on} = E_{ON} * f;$$

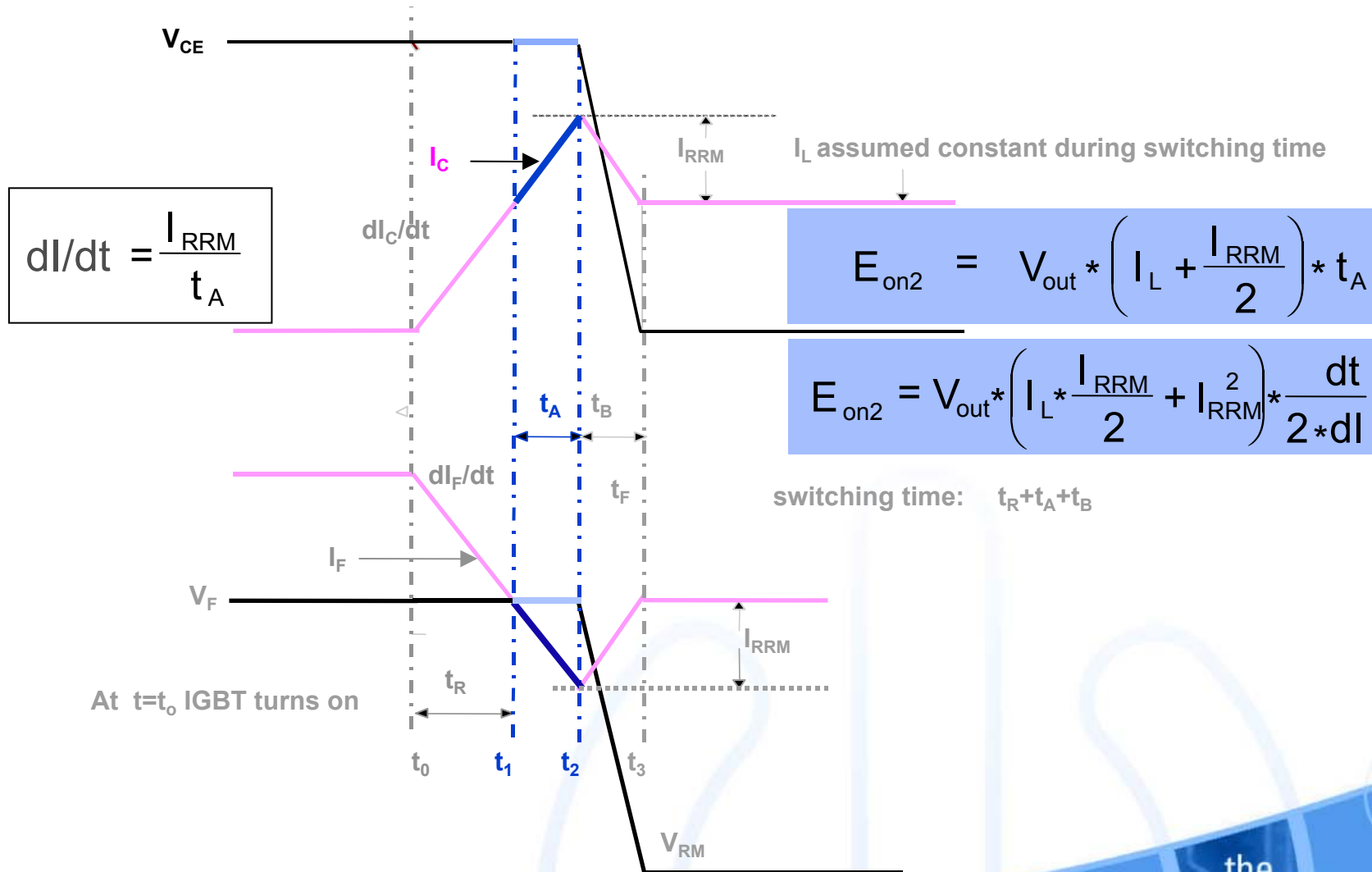
$$P_{off} = E_{OFF} * f$$



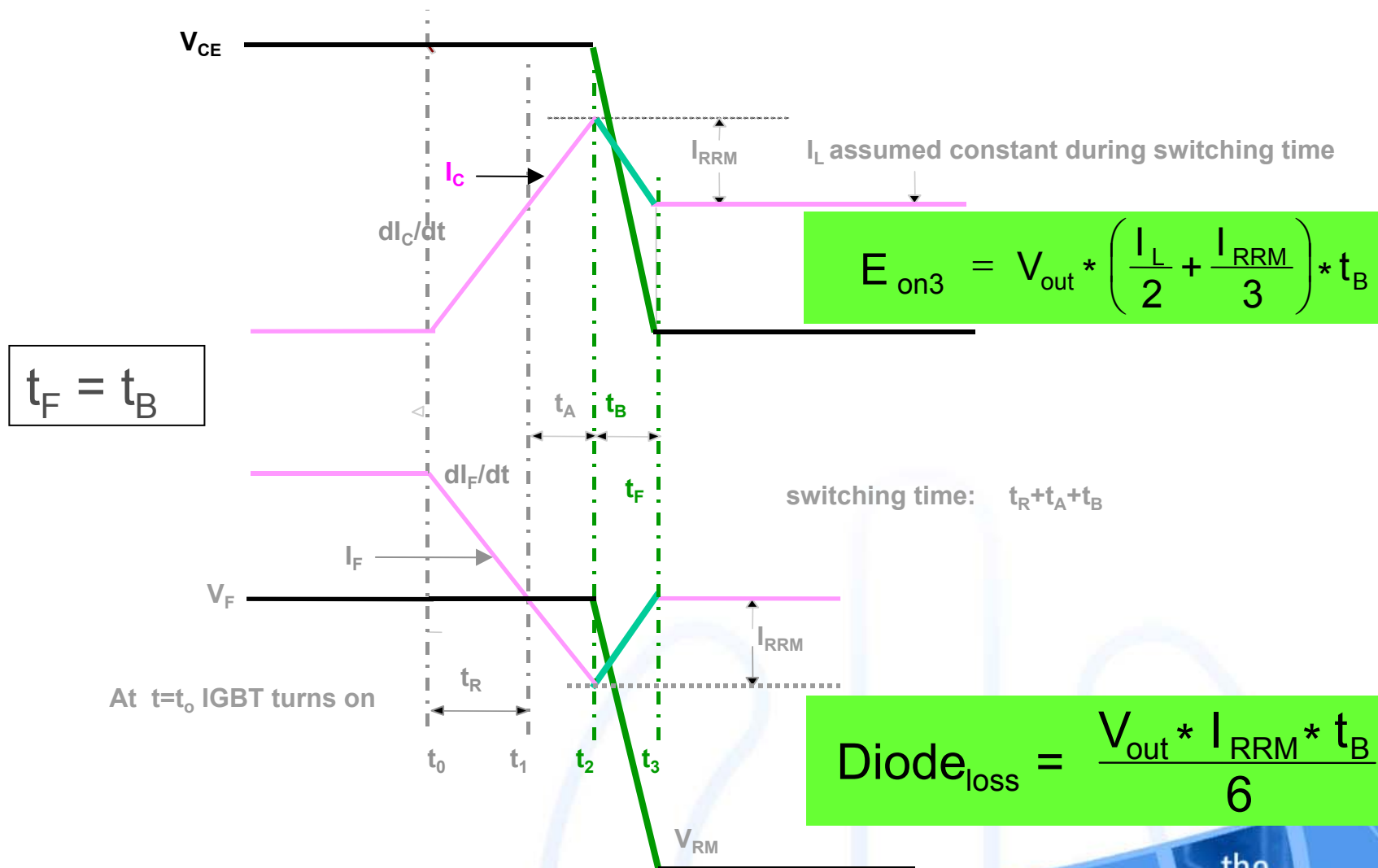
# Потери при включении из-за восстановления диода (Phase $t_R$ )



# Потери при включении из-за восстановления диода (Phase $t_A$ )

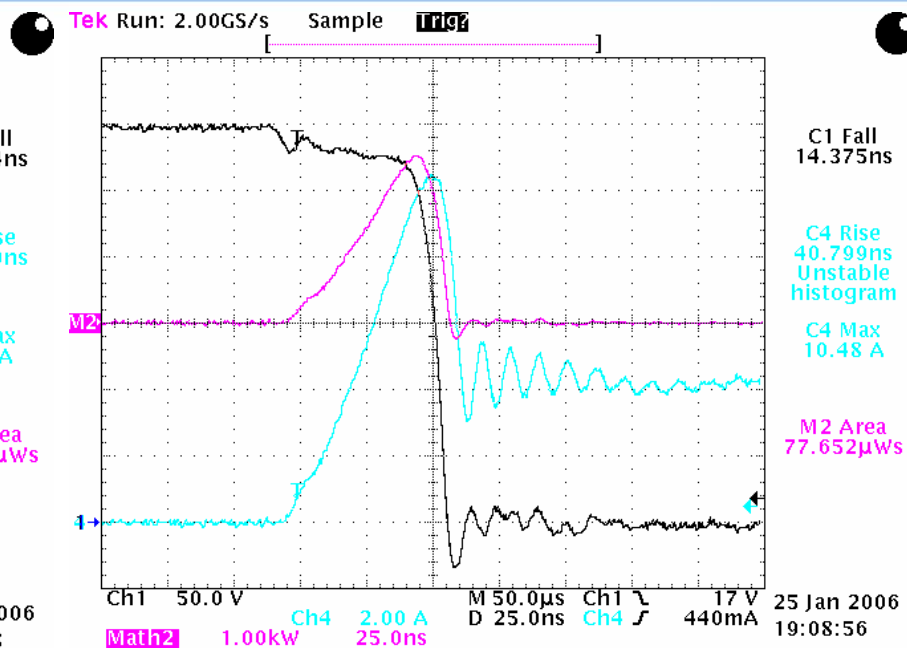
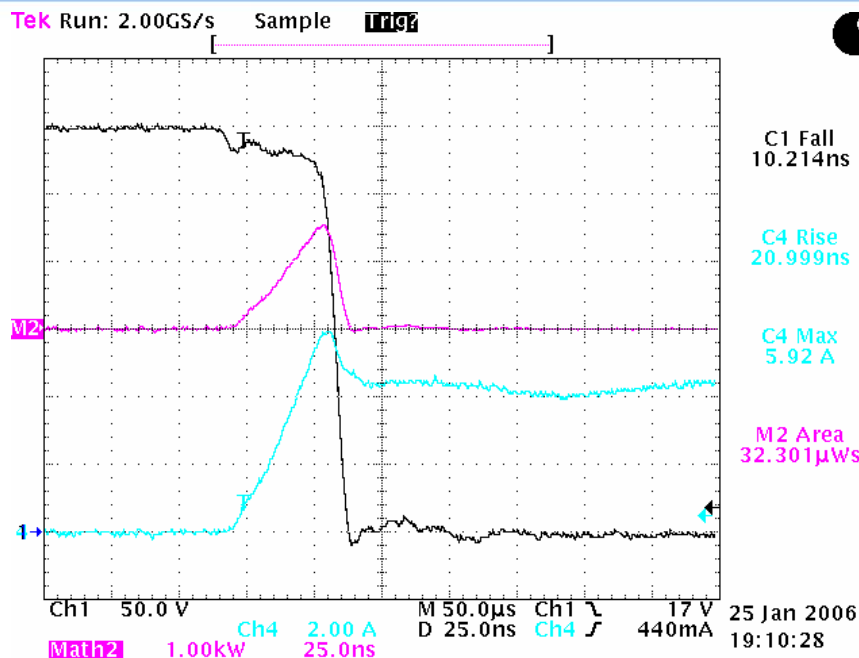


# Потери при включении из-за восстановления диода (Phase $t_B$ )

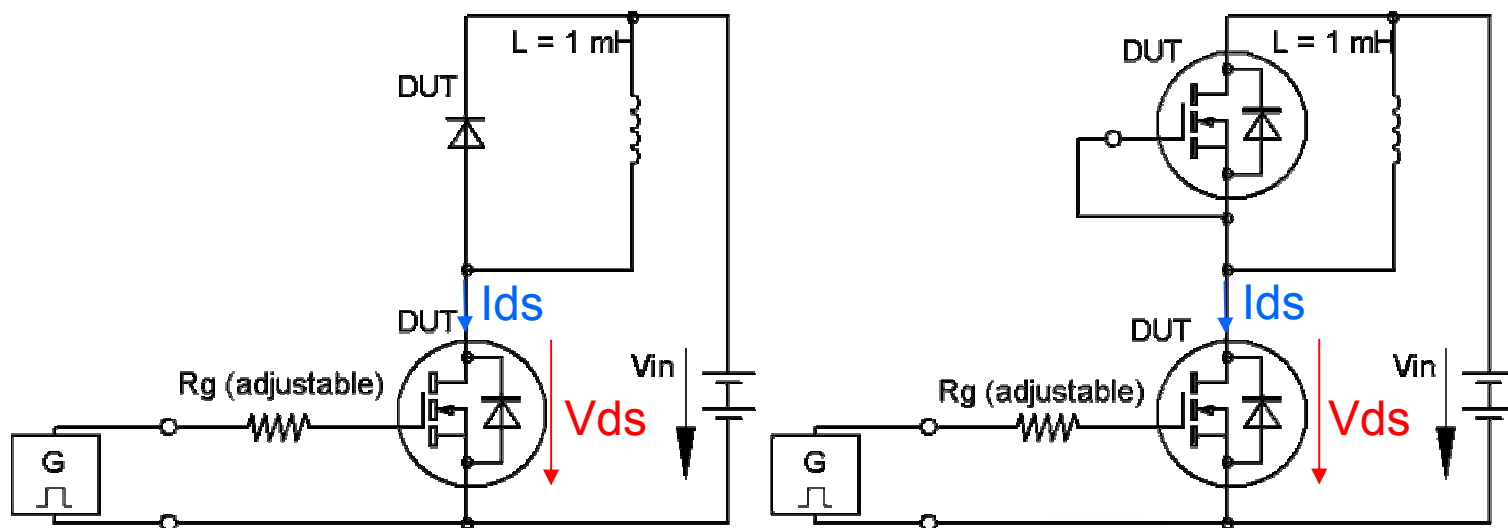




# Двойная проверка формул:

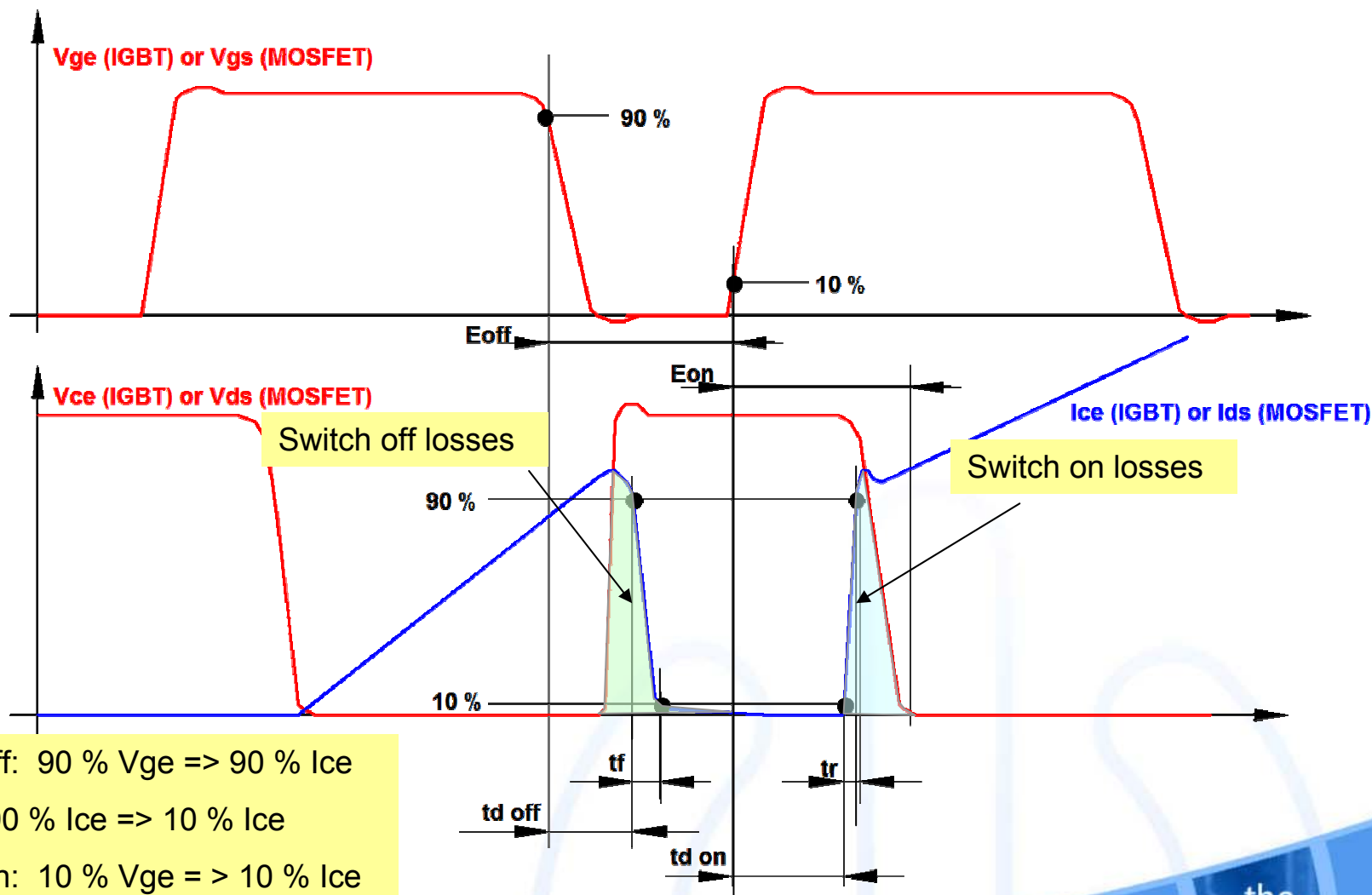


Eon =	32.67 uJ	Pon =	1.63 W	50 (kHz)	Frequency
Eon1 =	11.20 uJ	Pon =	0.56 W	4 (A)	Current
Eon2 =	14.00 uJ	Pon =	0.70 W	280.00 (V)	Udc
Eon3 =	7.47 uJ	Pon =	0.37 W	2.00E+08 (A/s)	dl/dt
Diode:				2 (A)	Irr; Diode
Eoff =	9.33E-01 uJ	Poff =	0.05 W	1.00E-08 (s)	tf fall time



Тестовые схемы, которые использованы в следующих измерениях

# Диаграммы и определение потерь



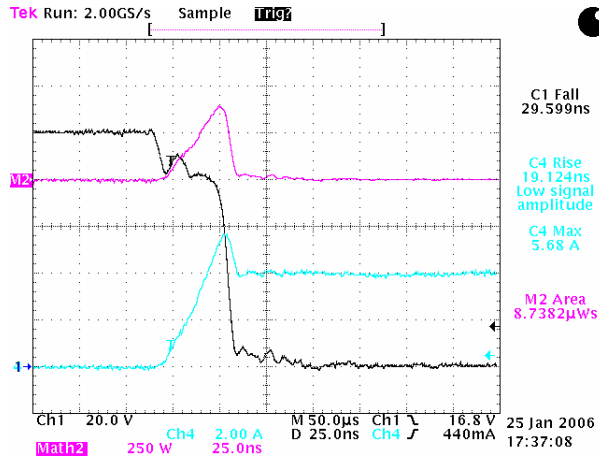
td off: 90 %  $V_{ge}$  => 90 %  $I_{ce}$

tf: 90 %  $I_{ce}$  => 10 %  $I_{ce}$

td on: 10 %  $V_{ge}$  => 10 %  $I_{ce}$

tr: 10 %  $I_{ce}$  => 90 %  $I_{ce}$

# Динамические потери по напряжению

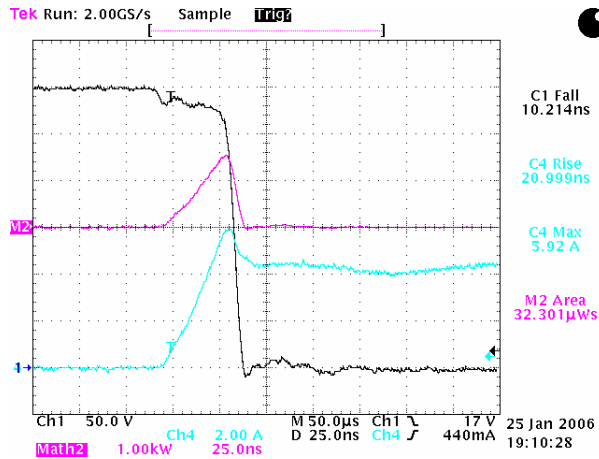
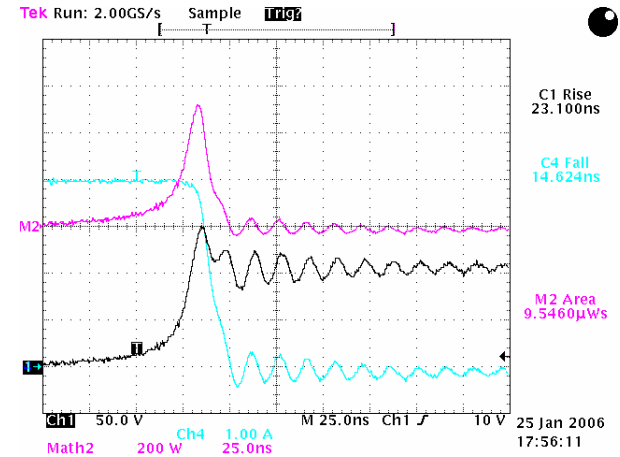


$$E_{ON} / E_{OFF} \text{ losses}$$

$$V_{IN} = 100V$$

$$E_{ON} = 8.7\mu J$$

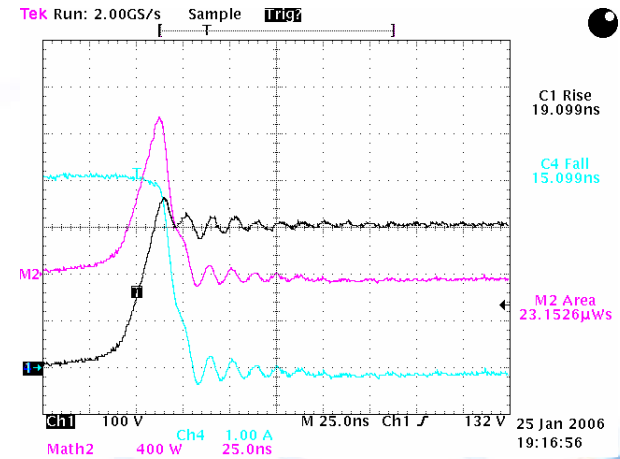
$$E_{OFF} = 9.5\mu J$$



$$V_{IN} = 300V$$

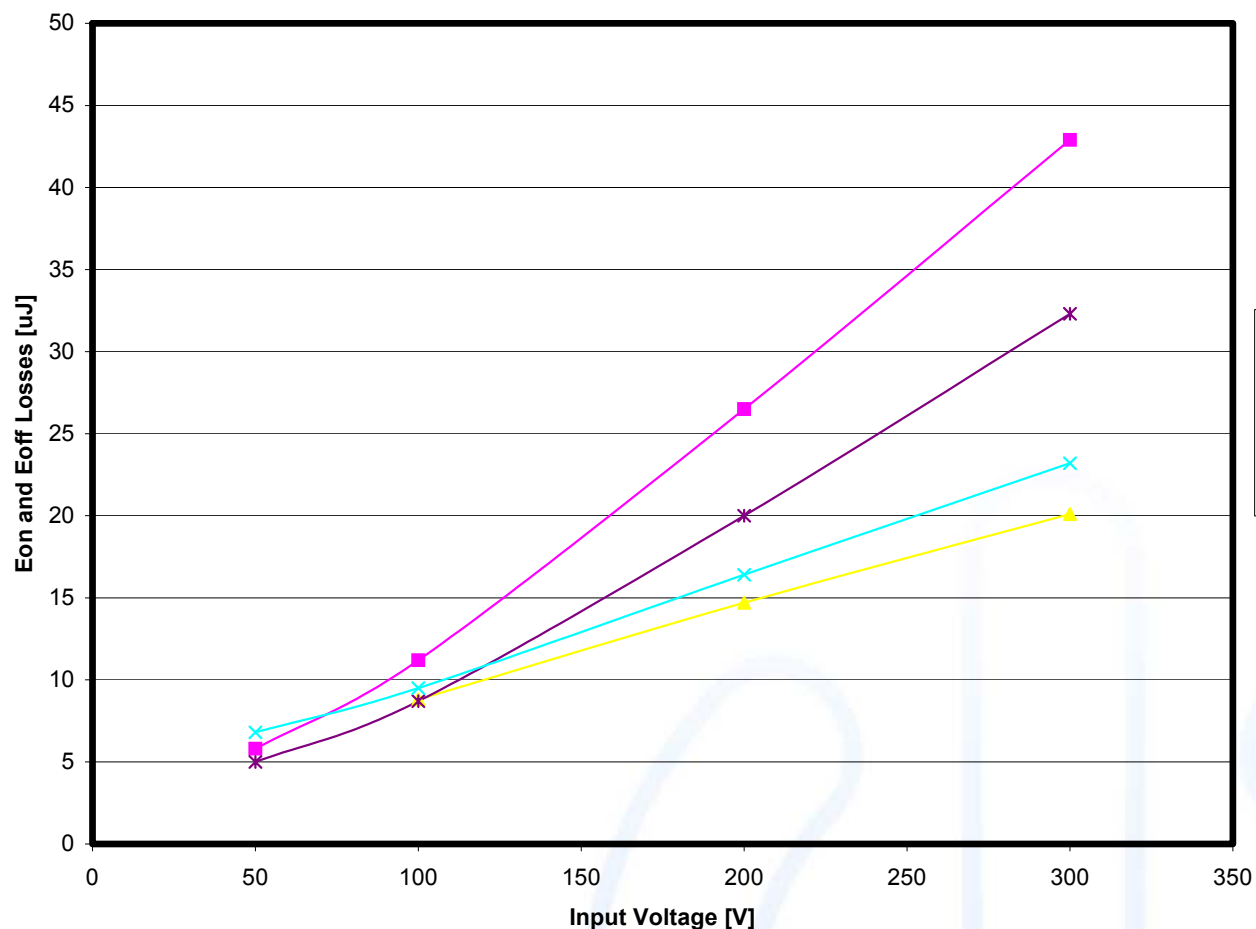
$$E_{ON} = 32.3\mu J$$

$$E_{OFF} = 23.1\mu J$$



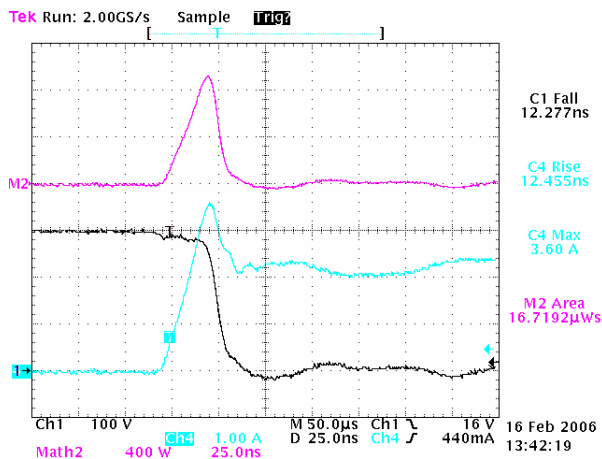
# Динамические потери по напряжению: $E_{ON}$ и $E_{OFF}$ потери

Eon and Eoff losses of the FET - FQP9N50C vs Input Voltage

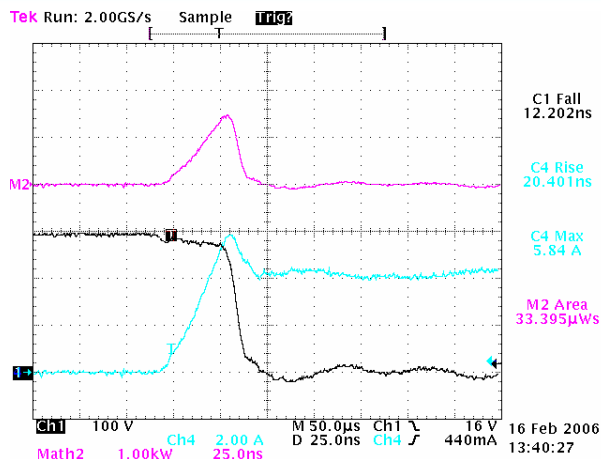


Comparison of two Stealth™ diodes, which are optimized for hard switching

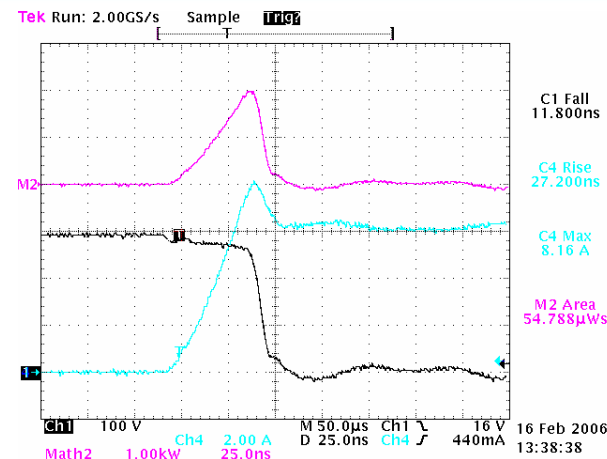
# Динамические потери по току FQP9N50C + ISL9R460 @ $V_{IN} = 300V$



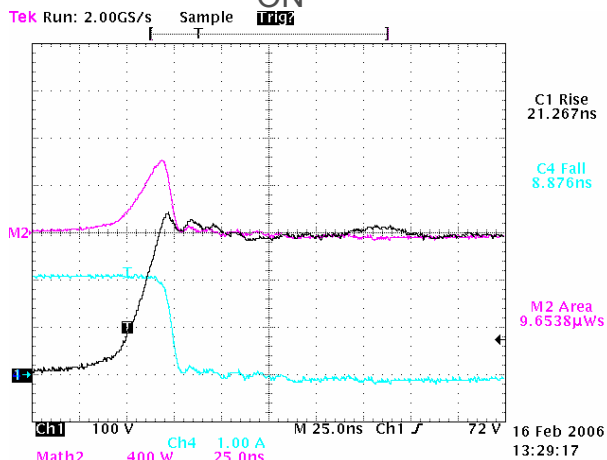
$$I = 2A, E_{ON} = 16.7\mu J$$



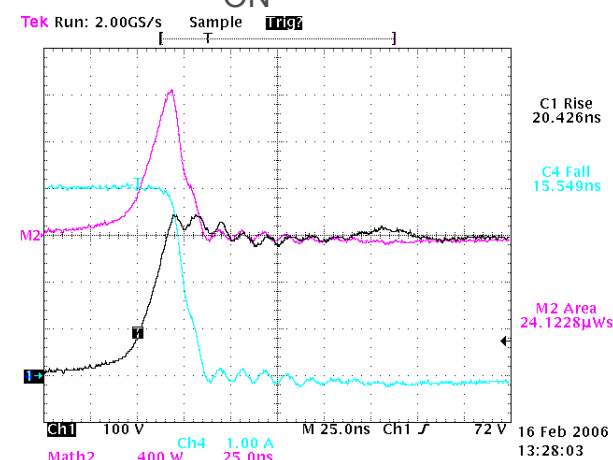
$$I = 4A, E_{ON} = 33.4\mu J$$



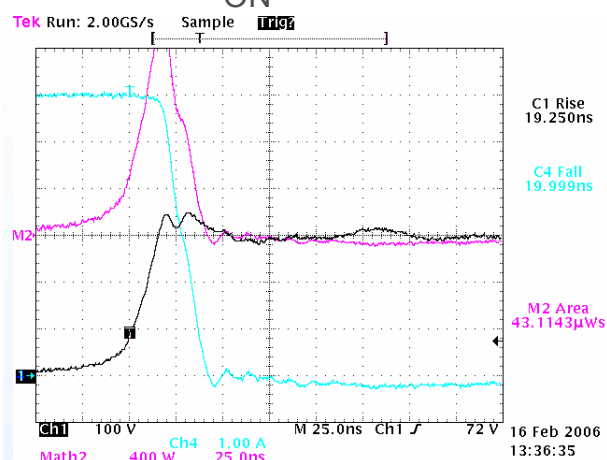
$$I = 6A, E_{ON} = 54.8\mu J$$



$$I = 2A, E_{OFF} = 9.7\mu J$$



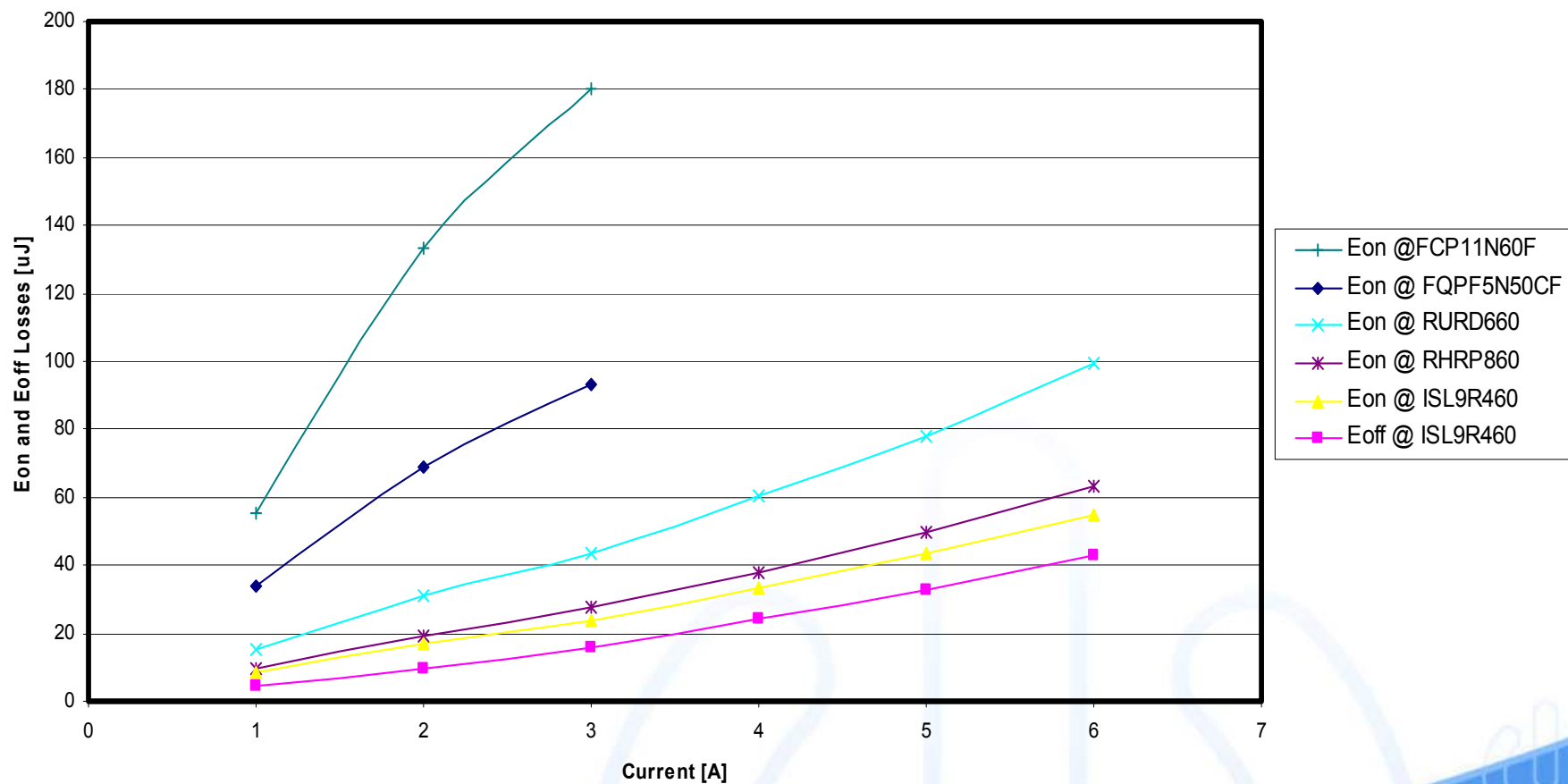
$$I = 4A, E_{OFF} = 24.1\mu J$$



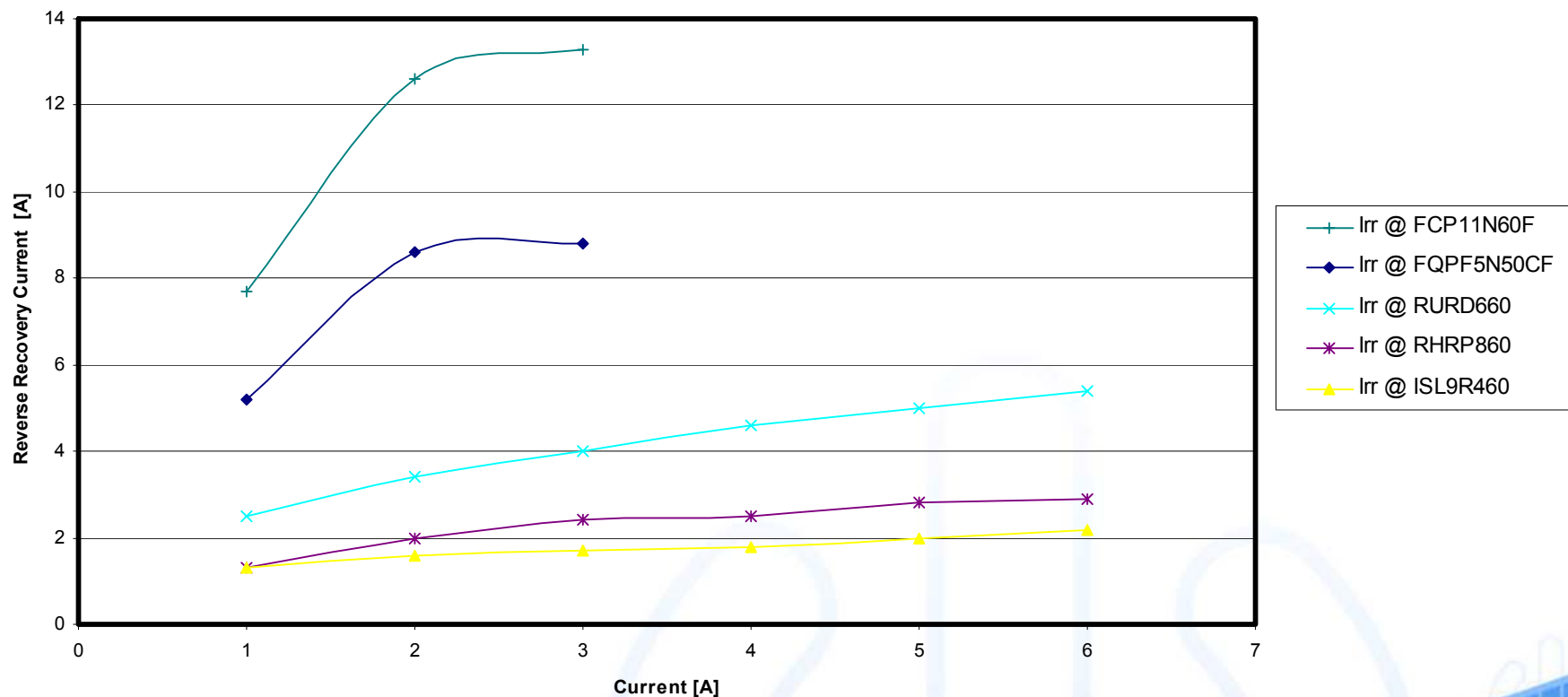
$$I = 6A, E_{OFF} = 43.1\mu J$$

# Изменение $E_{ON}$ и $E_{OFF}$ потерь входного тока для различных диодных технологий

Eon and Eoff losses of the FET - FQP9N50C vs Current

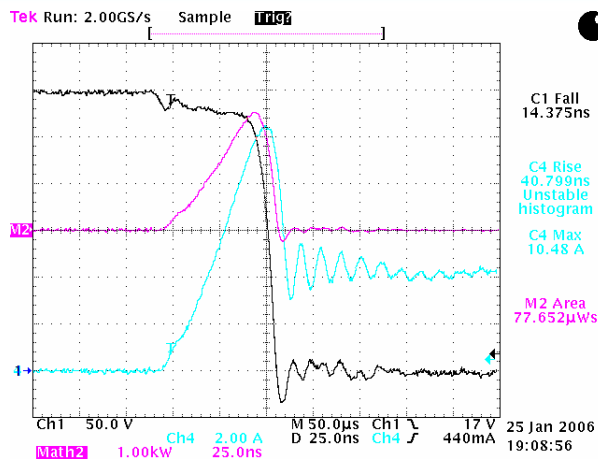


$I_{rr}$ , Reverse Recovery Peak Current of the Diode vs Current

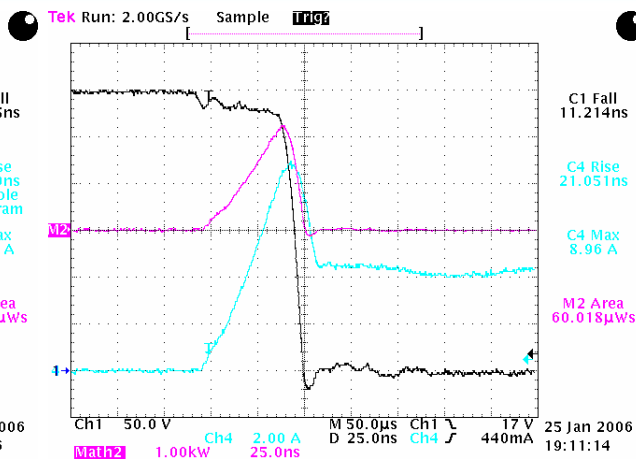




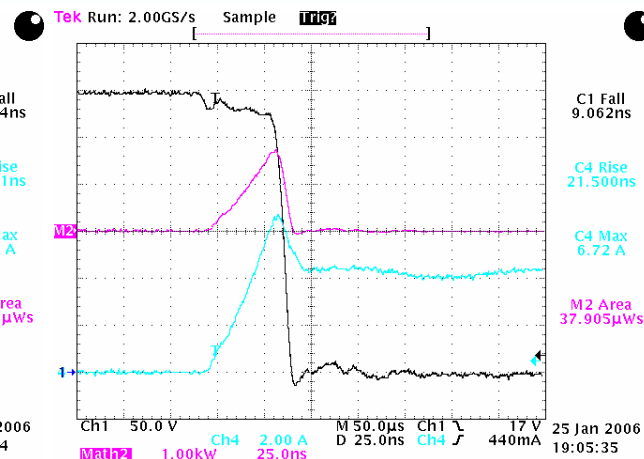
# $E_{ON}$ потерь при жесткой коммутации с диодами выполненными по различной технологией, при $V_{IN} = 300V$ @ $I = 4A$



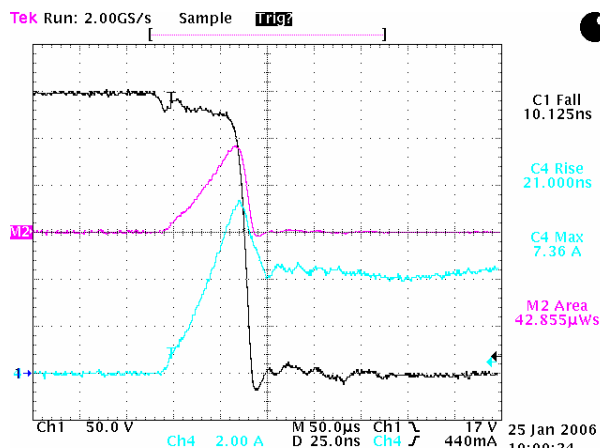
MUR1560;  $E_{ON} = 77.7\mu J$



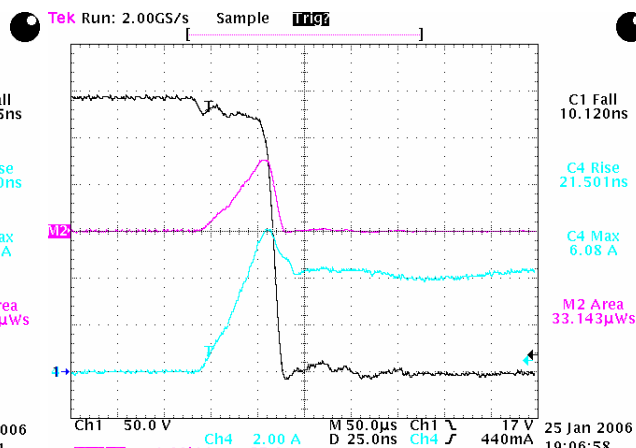
RURD660;  $E_{ON} = 60.1\mu J$



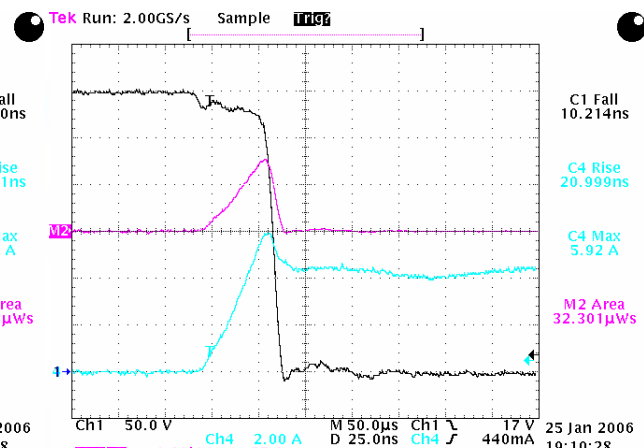
RHRP860;  $E_{ON} = 37.9\mu J$



ISL9R1560;  $E_{ON} = 42.9\mu J$



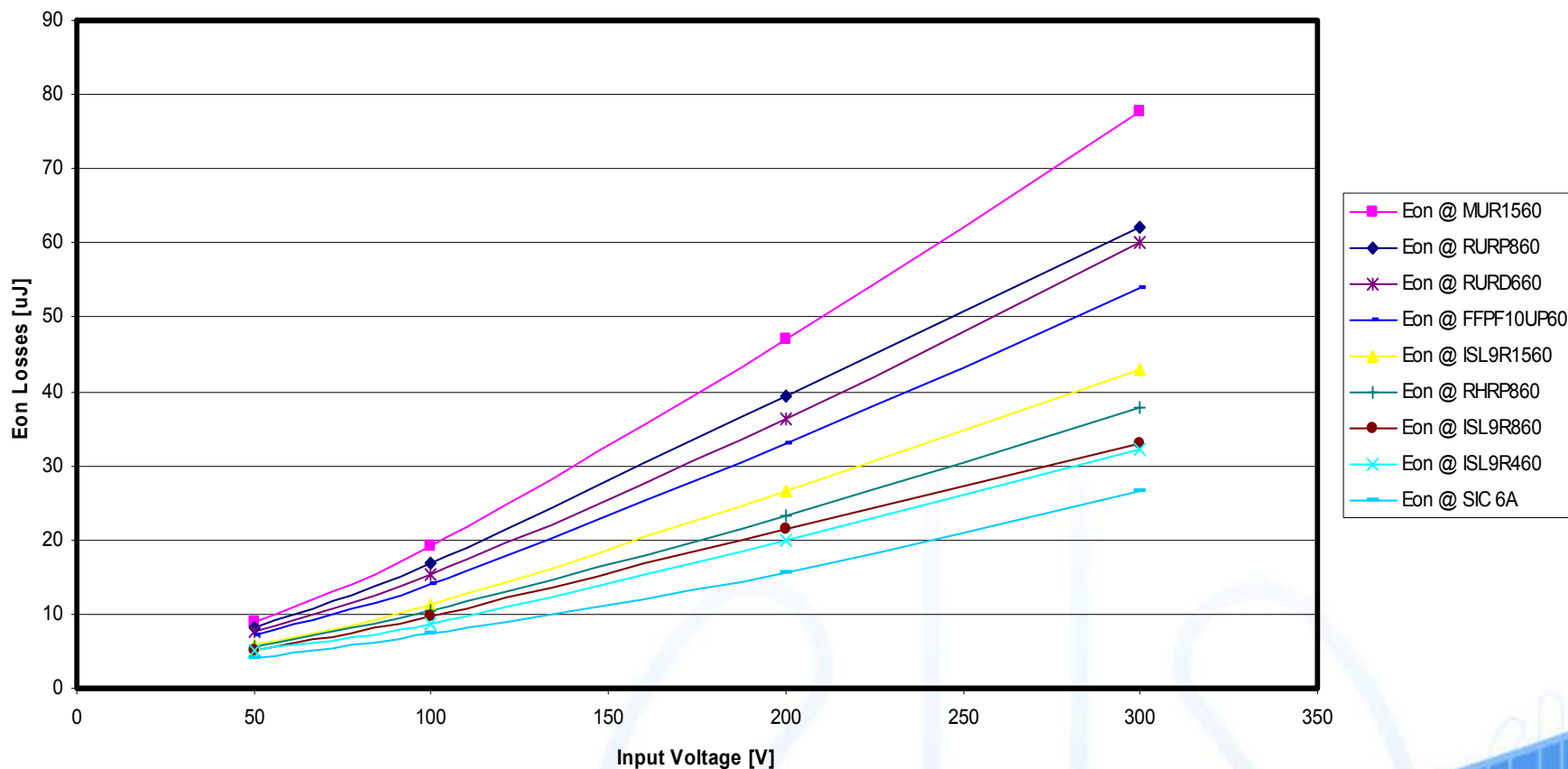
ISL9R860;  $E_{ON} = 33.1\mu J$



ISL9R460;  $E_{ON} = 32.3\mu J$

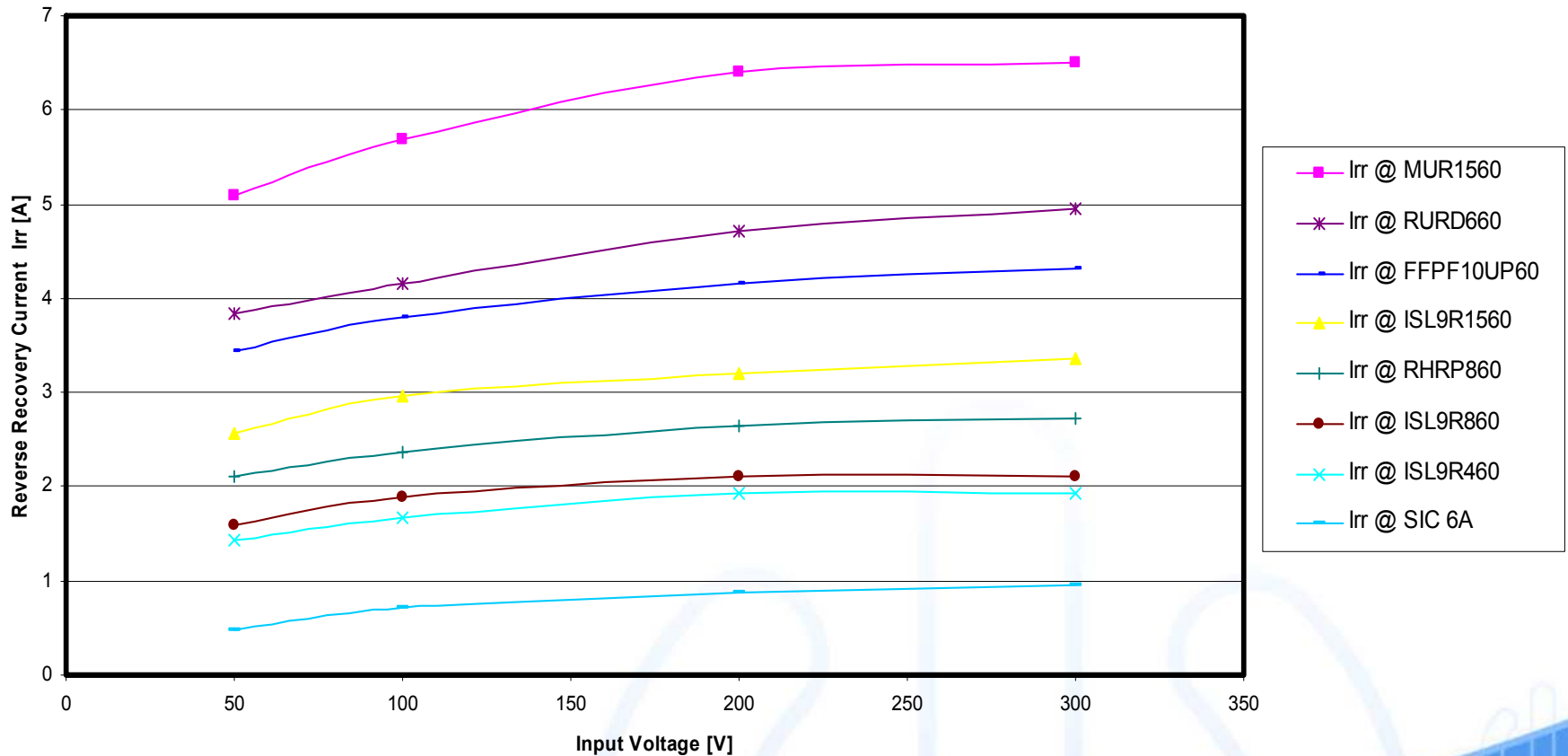
# Изменение $E_{ON}$ потерь при разном напряжении с диодами выполненными по различной технологии

Eon losses of the FET - FQP9N50C vs Input Voltage



# Изменение $I_{RRM}$ при разном напряжении с диодами выполненными по различной технологии

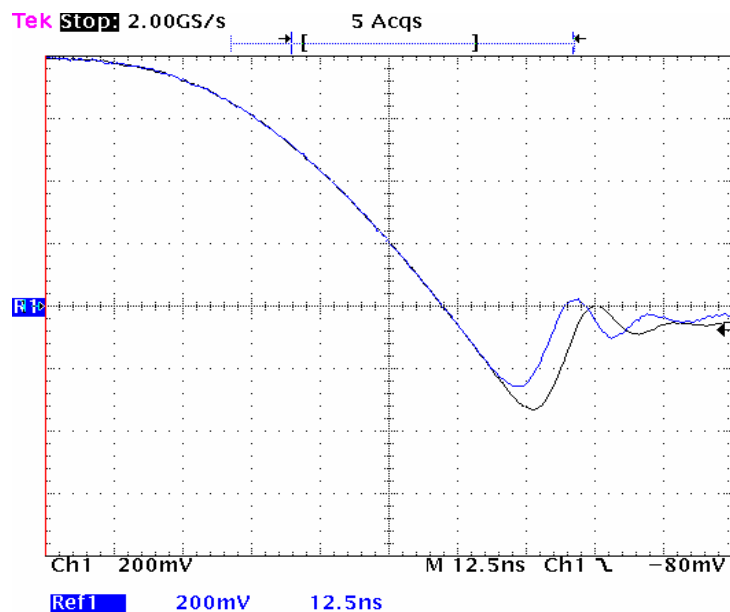
$I_{rr}$ , Reverse Recovery Peak Current of the Diode vs. Input Voltage



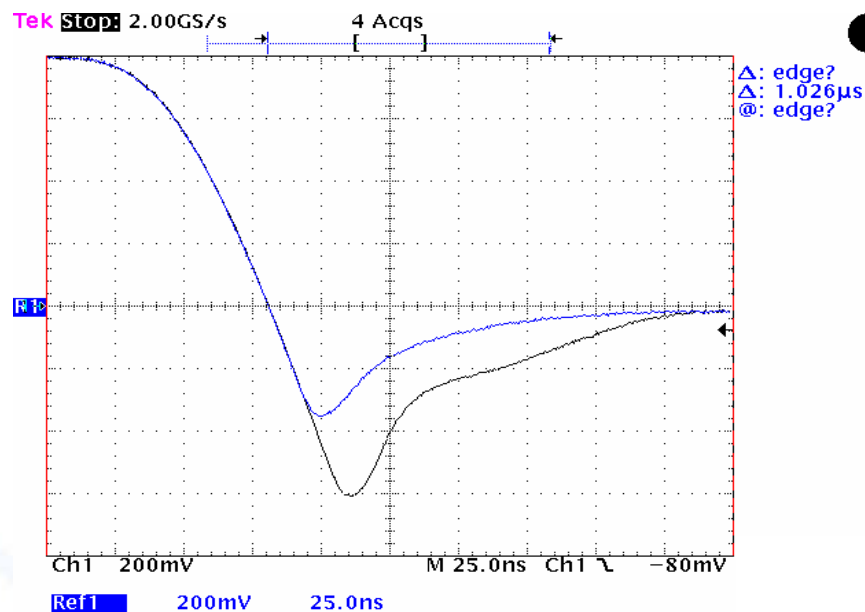
# Влияние температуры на время восстановления диода

$di/dt=200A/ms$ ,  $V_{dd}=400V$ ,  $I_f=8A$ ,  $T_j=25^{\circ}C$

Two industry standard diodes



Results for  $T_j = 25^{\circ}C$



Results for  $T_j = 125^{\circ}C$

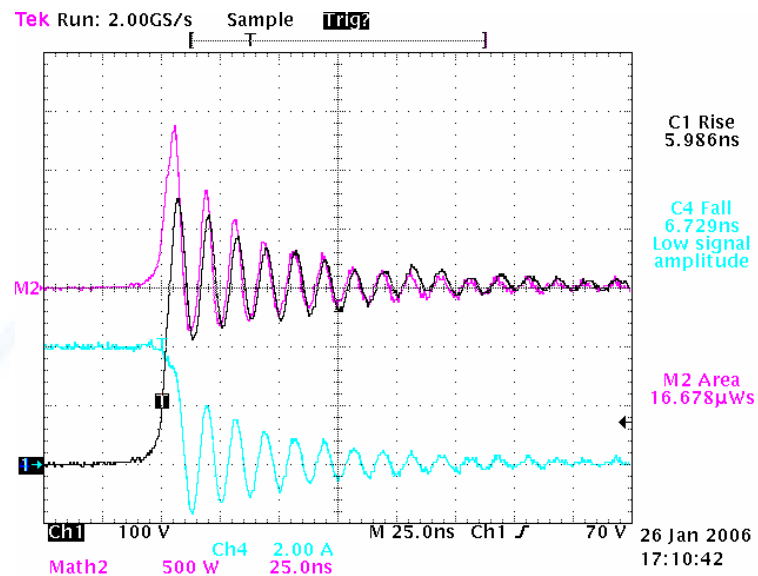
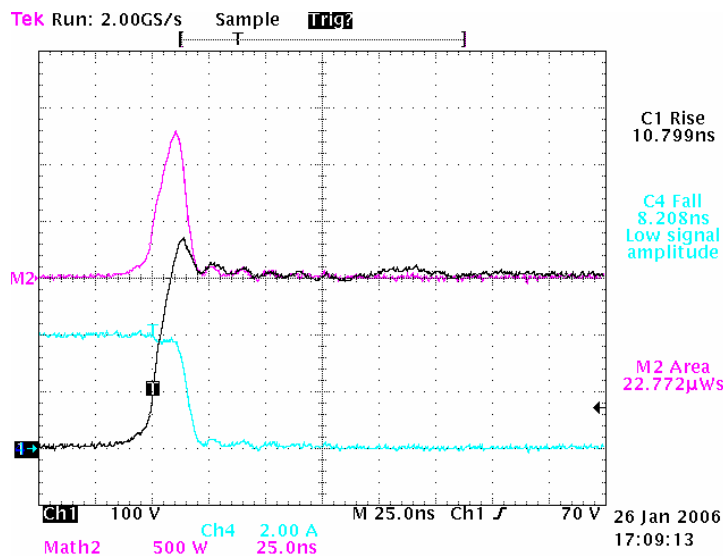
- Switching off:

Same FET, reducing Rg:

$$E_{\text{OFF}} = 22.8\mu\text{J} \Leftrightarrow 16.7\mu\text{J}$$

Drawback: ringing due to parasitic Ind. & Caps

All measurements: FDD6N50 + ISL9R460, U = 300V, I = 4A



## Switching on:

Using faster FET and smaller gate resistance

Left: FQP9N50C,  $R_g = 30\Omega$   
Right: FDD6N50,  $R_g = 30\Omega$

$$E_{ON} = 23.2\mu J \Leftrightarrow 15.3\mu J$$

$$dI/dt = 400A/\mu s \Leftrightarrow 640A/\mu s$$

$$I_{RRM} = 2.6A \Leftrightarrow 3.9A$$

Left: FDD6N50,  $R_g = 10\Omega$   
Right: FDD6N50,  $R_g = 30\Omega$

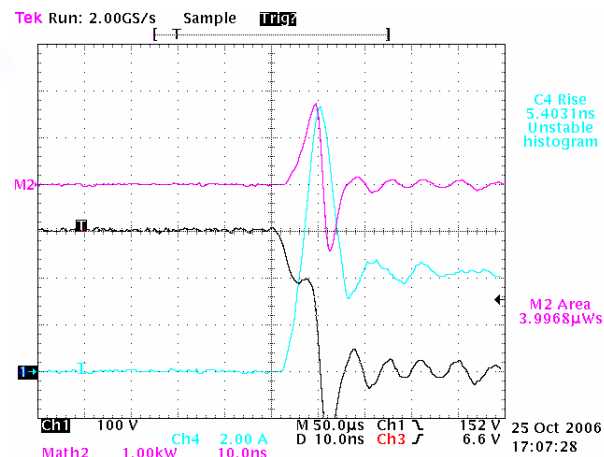
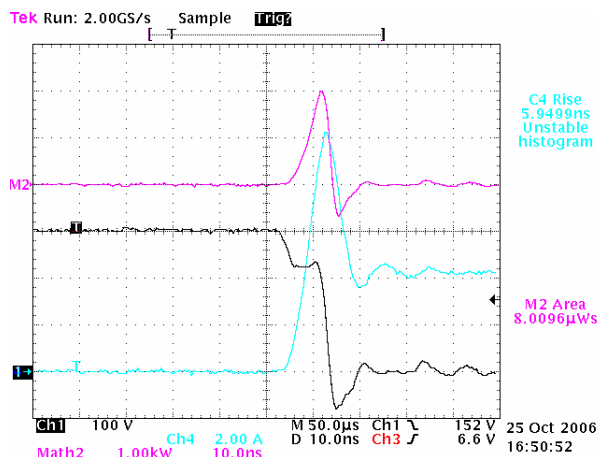
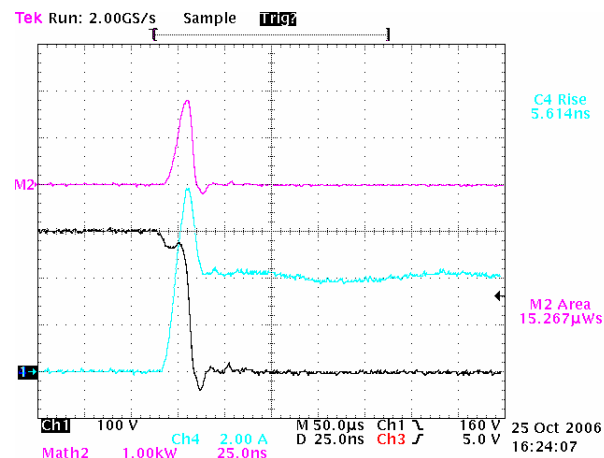
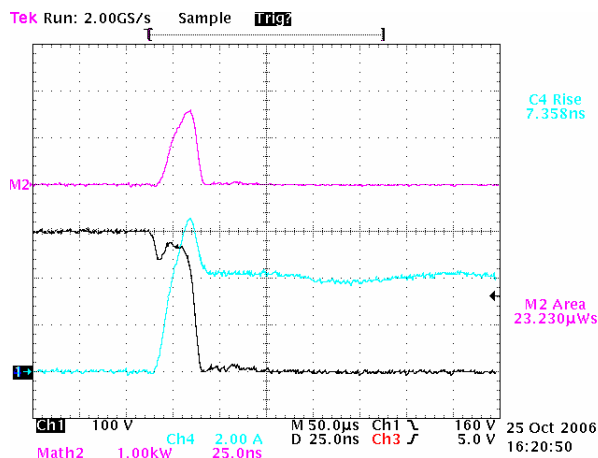
$$E_{ON} = 8\mu J \Leftrightarrow 4\mu J$$

$$dI/dt = 1400A/\mu s \Leftrightarrow 1600A/\mu s$$

$$I_{RRM} = 6.2A \Leftrightarrow 7.4A$$

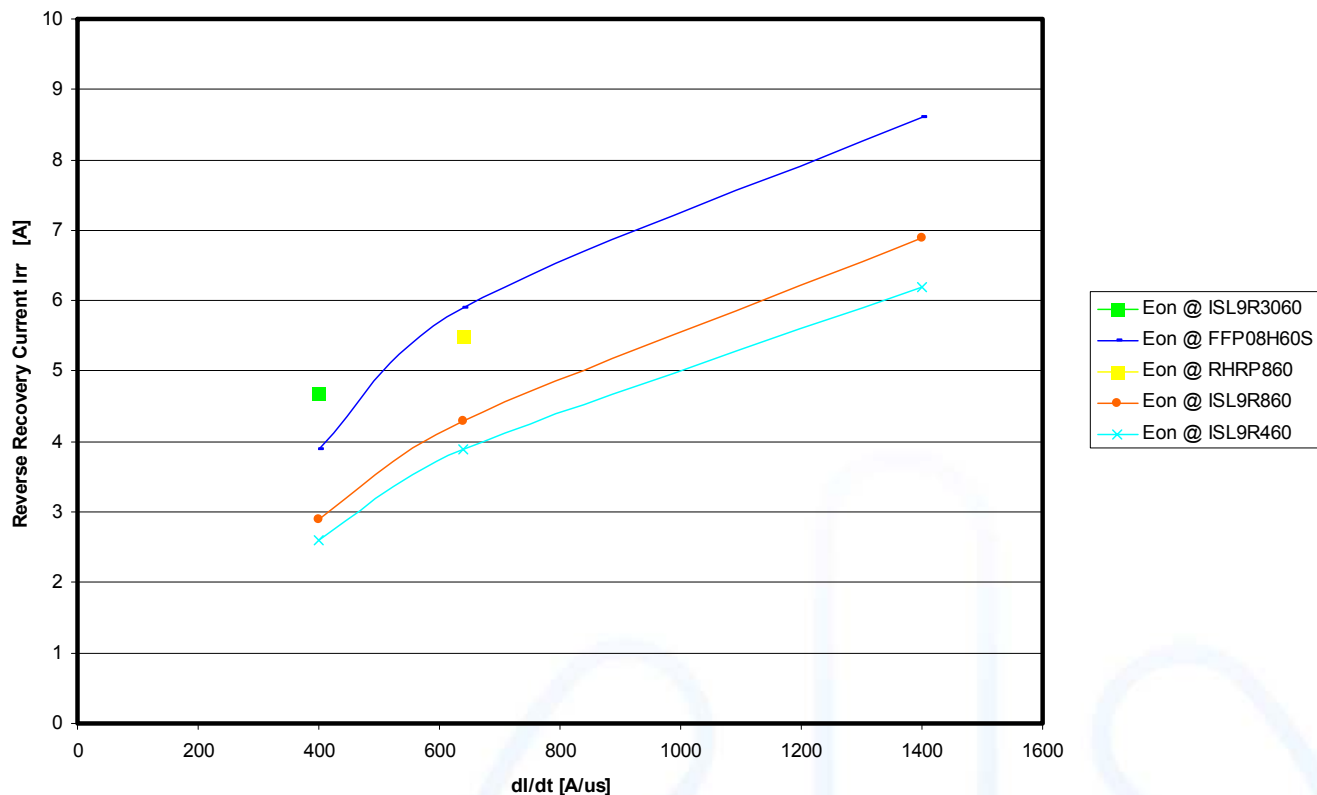
All measurements:

Diode = ISL9R460,  $U = 300V$ ,  $I = 4A$



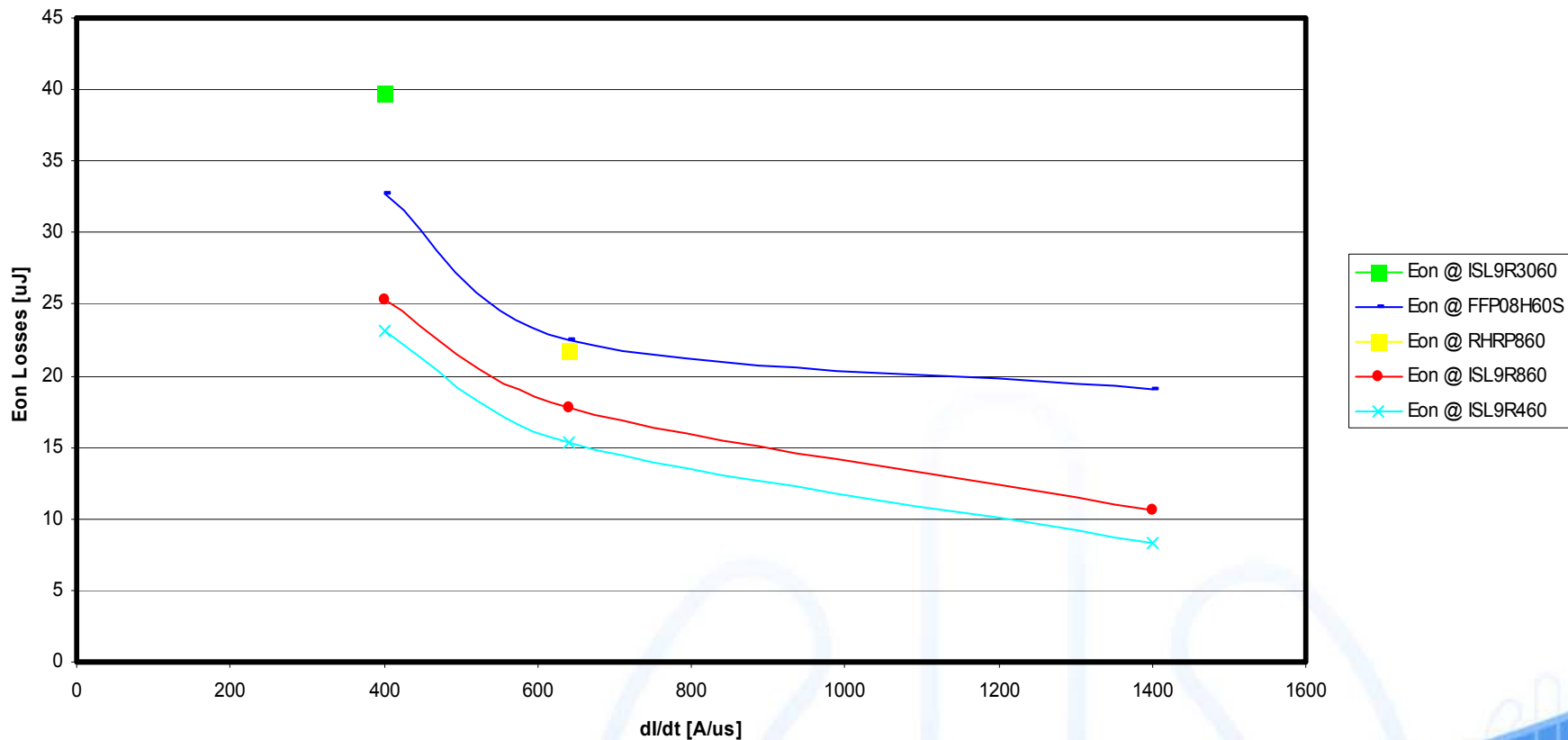
# Изменение $I_{RRM}$ при разном $di/dt$ с диодами выполненными по различной технологии

Reverse Recovery Current  $I_{rr}$  of the Diode vs  $di/dt$  @  $V = 300V$  @  $I = 4A$



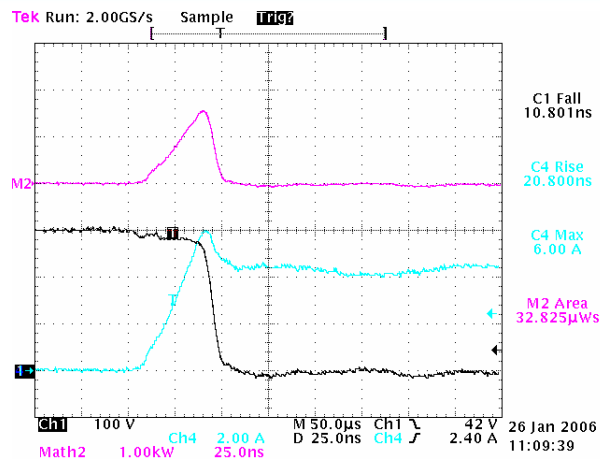
# Изменение $E_{ON}$ потерь от $di/dt$ для различных диодных технологий

Eon losses of the FET vs  $di/dt$  @  $V = 300V$  @  $di/dt = 4A$

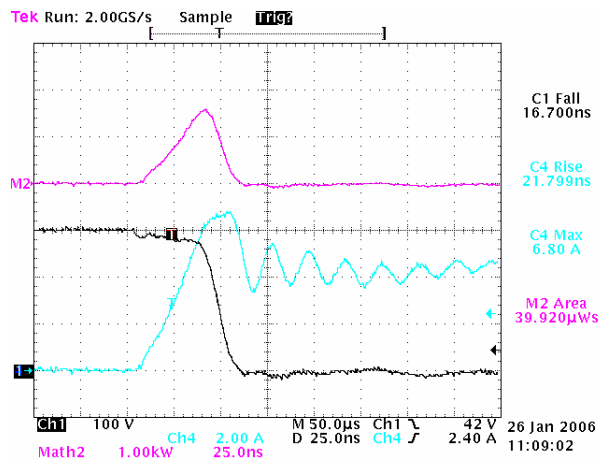




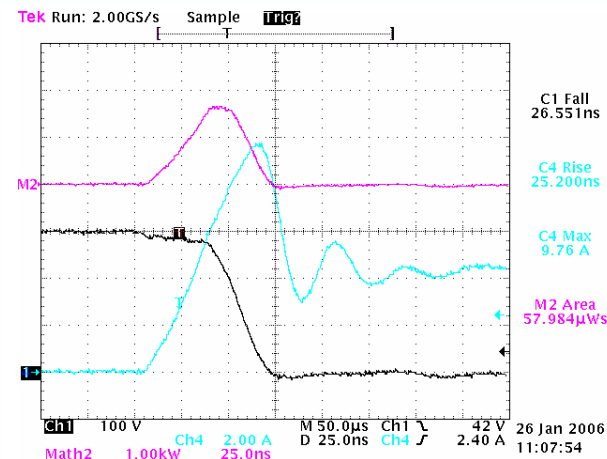
# Влияние параллельной емкости на динамические потери, при $V_{IN} = 300V$ @ $I = 4A$ @ ISL9R460



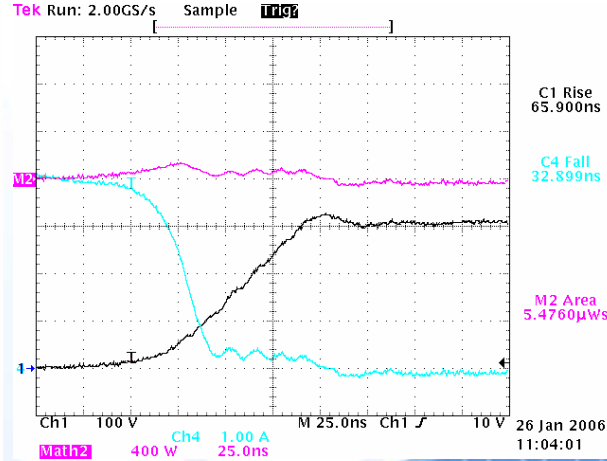
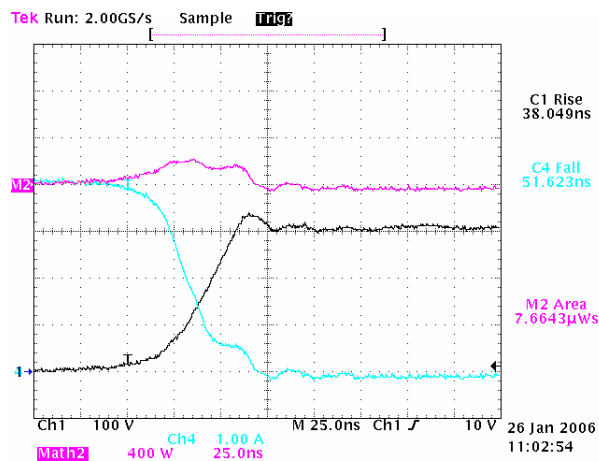
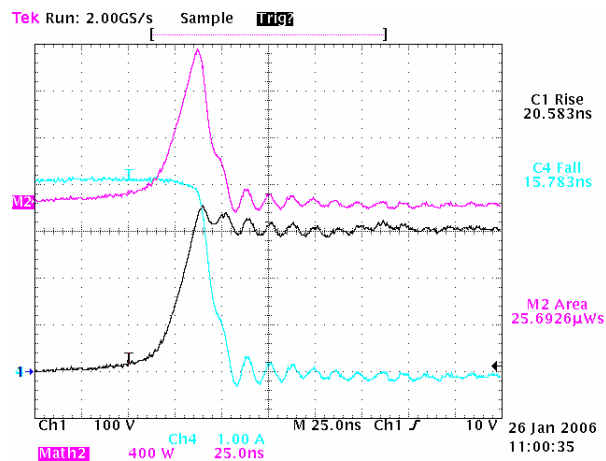
No parallel Capacitance



$C_{par} = 470pF$



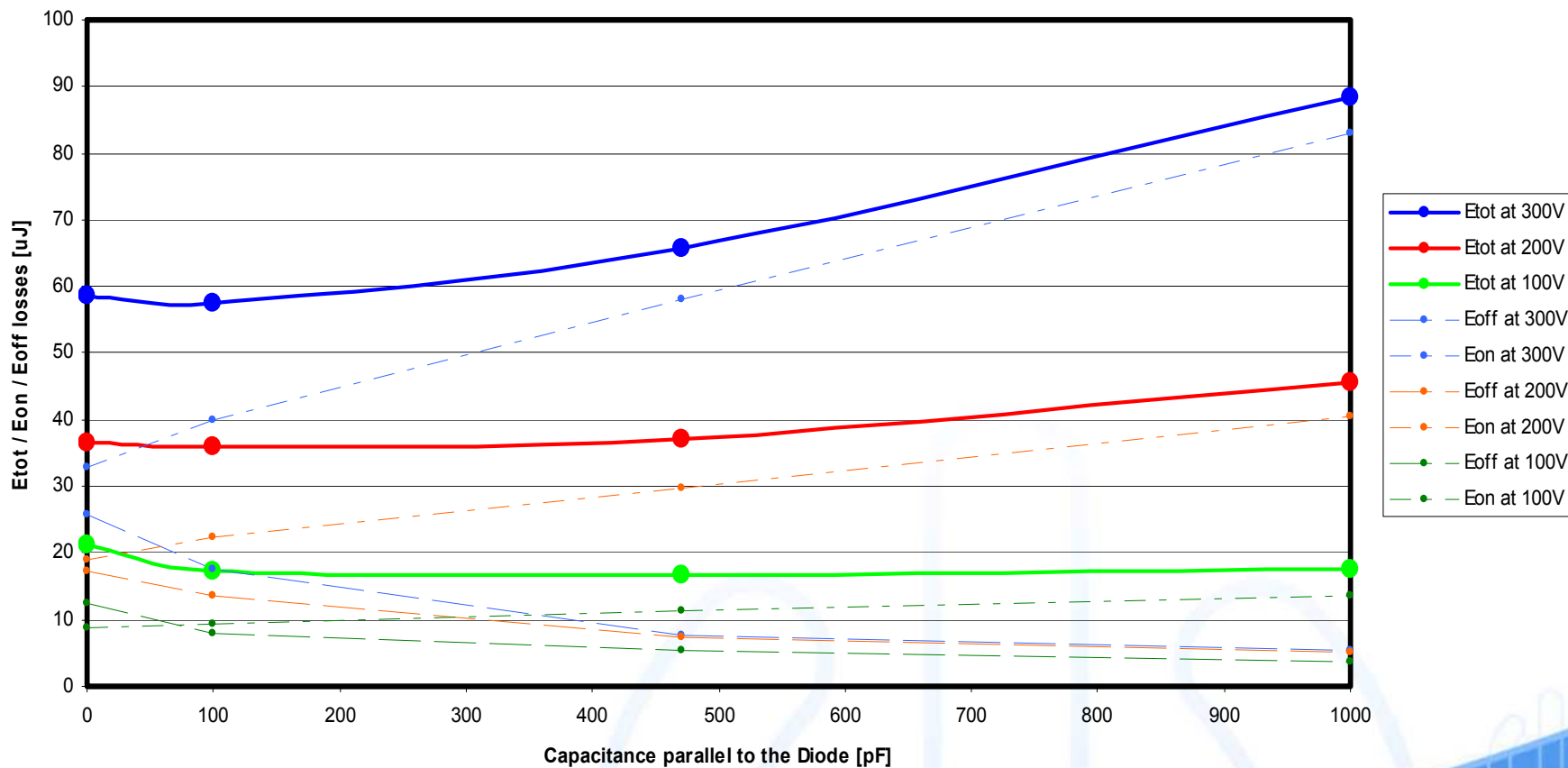
$C_{par} = 1nF$



Top: Большое снижение энергии потерь из-за параллельной емкости

Second row: Преимущество в режиме выключения

Eon and Eoff losses with a snubber Capacitance



- Обратное восстановление в диодах в полу мостовых структурах
  - Малые потери в диодах
  - Большие потери в MOSFET/IGBT
- $I_{RRM}$  и  $t_{RR}$  увеличиваются с ростом:
  - Температуры
  - $di/dt$
  - Тока
- Большой ток диода, той же самой семьи
  - Имея выше  $I_{RRM}$  приводит к более высокой  $E_{ON}$
  - Имея большую емкость, приводя к снижению  $E_{OFF}$
  - Причина повышения всех динамических потерь
- Выше  $di/dt$  приводит к более низким потерям  $E_{ON}$ , несмотря на выше  $I_{RRM}$
- Дополнительная внешняя емкость
  - Увеличивает  $E_{ON}$  потерь но уменьшает  $E_{OFF}$  потери
  - Дополнительная внешняя емкость могла уменьшить суммарные потери.