



Токовый режим работы фотоэлектронного умножителя для регистрации кинетики слабых световых сигналов

А.С. Макарова

В.И. Соломонов, А.В. Спирина, А.И. Липчак, А.В. Спирин, В.В. Лисенков

XXIII Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
г. Екатеринбург

Регистрация кинетических кривых



Импульсный режим работы ФЭУ
(режим счета фотонов)

Токовый режим работы ФЭУ с согласованной нагрузкой ($R=50 \text{ Ом}$)

1). Низкий уровень сигнала; 2). Требуются предварительные усилители; 3). Необходима частотная фильтрация от шумов, вносимых ФЭУ и предварительным усилителем.

Токовый режим работы ФЭУ без согласования с нагрузкой ($R=1 \text{ МОм}$)

- Высокий уровень сигнала;
- Большая стабильность работы;
- Относительно простое техническое исполнение регистрирующей аппаратуры;
- При обработке сигнала необходимо учитывать аппаратную функцию.

Цель данного исследования: показать возможность применения токового режима работы ФЭУ при несогласованном соединении ФЭУ и осциллографа коаксиальным кабелем для определения кинетических характеристик слабых световых сигналов.

Актуальность: исследование кинетических характеристик слабо люминесцирующих материалов.



Зависимость между фототоком I_p и напряжением на сопротивлении U_R

Выражение фототока I_p через измеряемое падение напряжения на сопротивлении U_R

$$I_p = \frac{CL}{R} \cdot \frac{d^2 U_R}{dt^2} + C \frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{R} \quad (1)$$

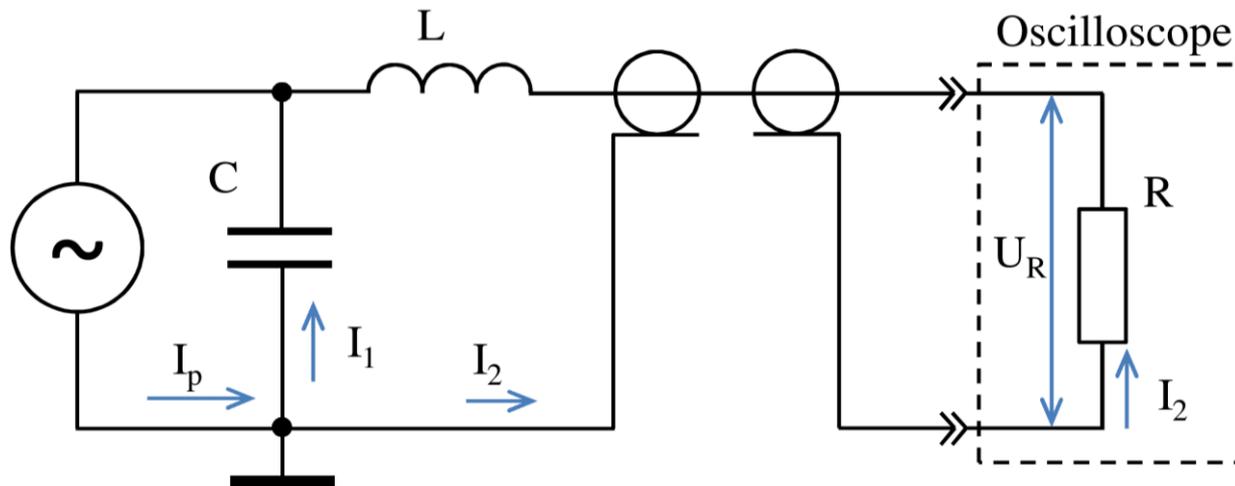
Решение НЛДУ относительно измеряемого сигнала U_R

$$U_R = \frac{R}{\tau_a} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \int_0^t I_p(t') e^{\frac{t'}{\tau_a}} dt' \quad (2)$$

Кинетическая аппаратная функция измерительной цепи

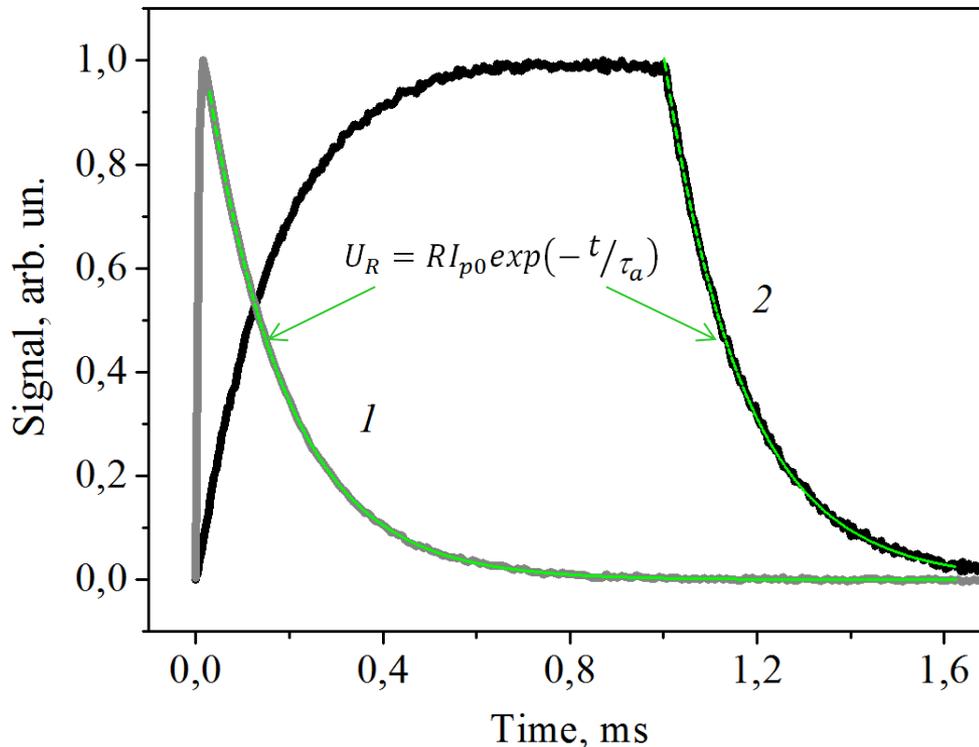
$$f(t, t') = \exp[-(t - t')/\tau_a] \quad (3)$$

$t-t'$ – промежуток между временем измерения U_R и текущим временем фототока
 $\tau_a = RC$ – характерное время разряда емкости или аппаратное время измерительной цепи



Эквивалентная электрическая схема измерительной цепи ФЭУ

Экспериментальное определение τ_a



1 - Зависимость $U_R(t)$ с ФЭУ-100 от рассеянного излучения второй гармоники лазера на неодиме LS-2134 ($\lambda=532$ нм) длительностью 15 нс на полувысоте;

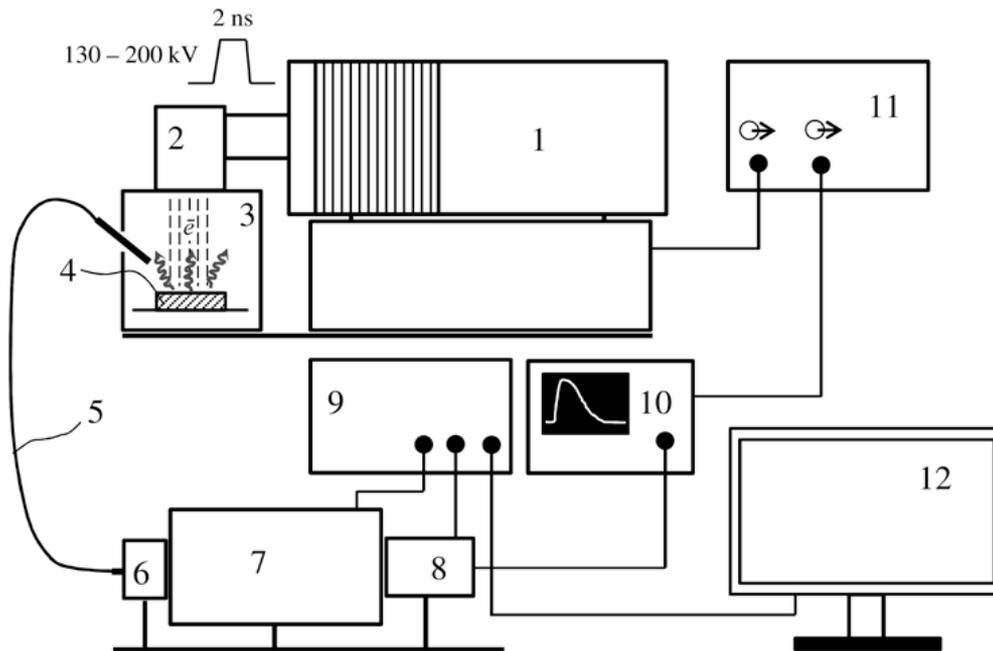
2 - Зависимость сигнала $U_R(t)$ с ФЭУ-62 от светодиода типа DSL65005 ($\lambda=650$ нм) с прямоугольной формой импульса длительностью 1 мс

$$\tau_a = 169 \pm 1 \text{ мкс (для ФЭУ-100)}$$

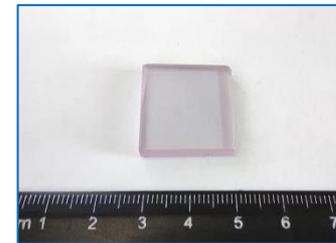
$$\tau_a = 172 \pm 1 \text{ мкс (для ФЭУ-62)}$$

$$I_p = \frac{\tau_a}{R} \left(\frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{\tau_a} \right)$$

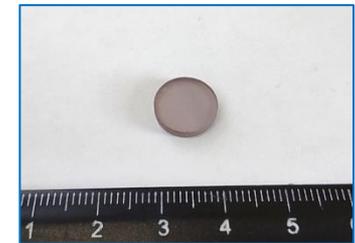
Образцы и экспериментальная аппаратура



Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения РАДАН–303, 2 – источник электронного пучка, 3 – экранированная камера, 4 – образец, 5 – волоконный световод, 6 – коллиматор для световода и блок светофильтров, 7 – монохроматор, 8 – ФЭУ, 9 – блок управления и регистрации, 10 – осциллограф, 11 – генератор тактовых импульсов, 12 – ПК.



Монокристалл Nd:ИАГ
Содержание Nd: 0,85 ат.%;



Керамика Nd:ИАГ
Содержание Nd: 1 ат.%;



Монокристалл Cr:ИАГ
Содержание Cr: 0,55 ат.%;



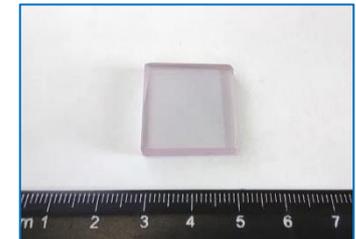
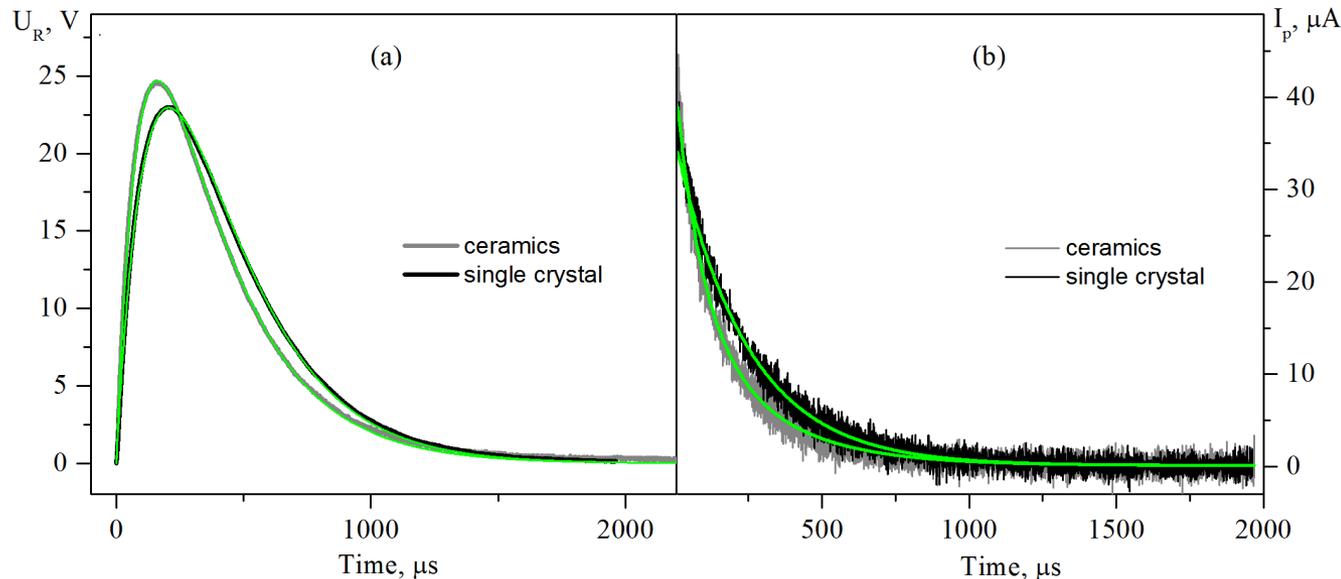
Керамика ИАГ

Параметры работы установки

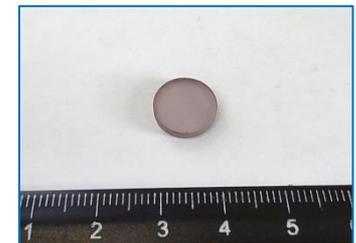
Средняя энергия электронов	170 кэВ;
Длительность импульса	2 нс;
Плотность тока	130 А/см ² ;
Спектральный диапазон работ ФЭУ	200-1200 нм;

Измерения проводились в воздухе при комнатной температуре образцов.

Деконволюция свертки. Nd:ИАГ



Монокристалл Nd:ИАГ
Содержание Nd: 0,85 ат.%;

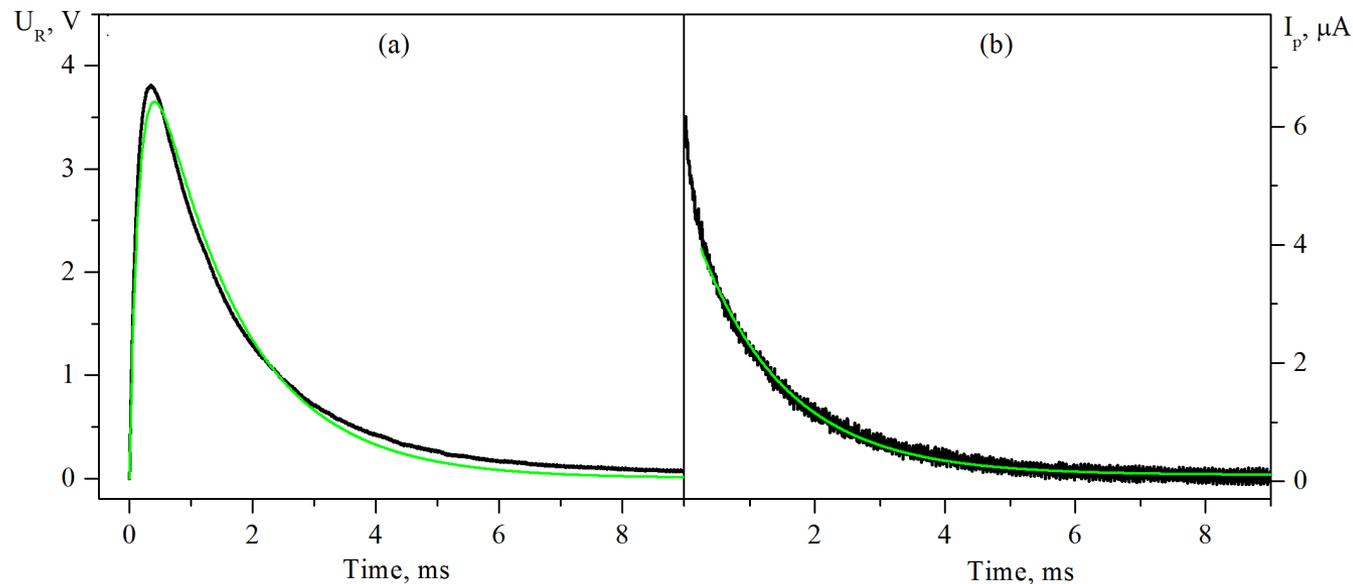


Керамика Nd:ИАГ
Содержание Nd: 1 ат.%;

Измеренные сигналы свертки U_R (a) и их деконволюция I_p (b) примесной полосы люминесценции Nd^{3+} при 1064 нм в монокристаллических и керамических образцах Nd:ИАГ

	Аппроксимационная кривая	Времена затухания
Монокристалл	$I_p = A_1 \exp(-t/\tau_{d1})$	$\tau_{d1}=244$ мкс
Керамика	$I_p = A_1 \exp(-t/\tau_{d1}) + A_2 \exp(-t/\tau_{d2})$	$\tau_{d1}=264$ мкс; $\tau_{d2}=87$ мкс

Деконволюция свертки. Cr:ИАГ

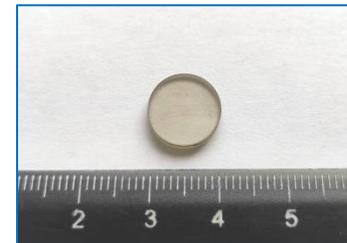
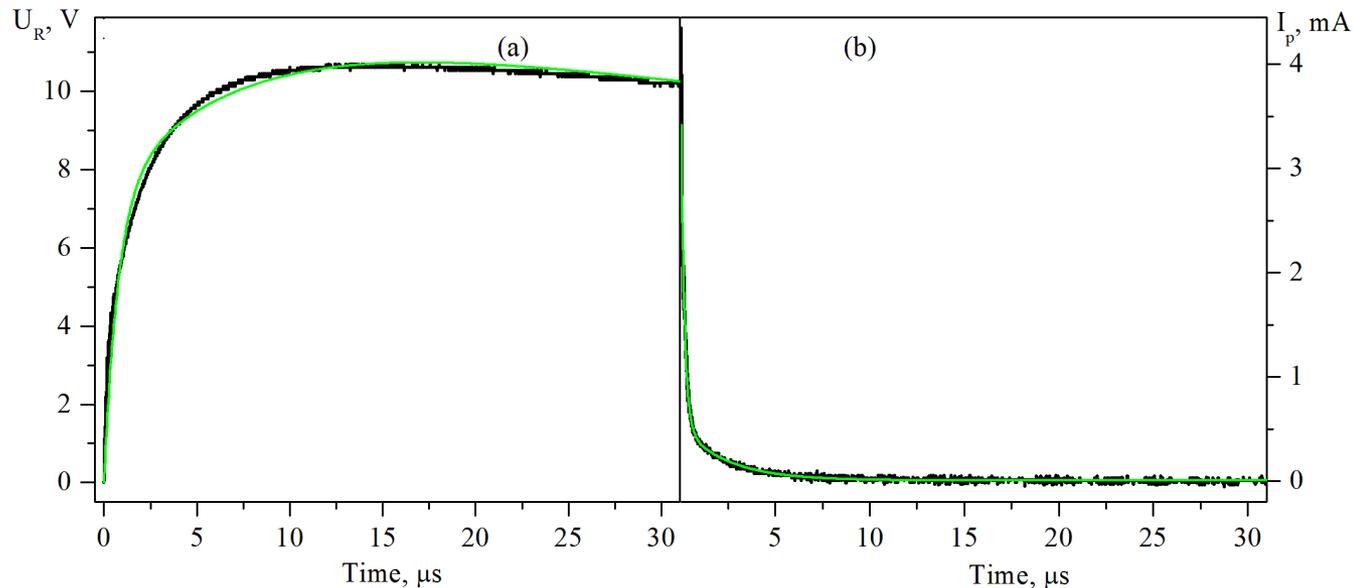


Монокристалл Cr:ИАГ
Содержание Cr: 0,55 ат.%;

Измеренный сигнал свертки U_R (a) и его деконволюция I_p (b) примесной полосы люминесценции Cr^{3+} при 687,4 нм в монокристаллических образцах Се:ИАГ

Аппроксимационная кривая	Времена затухания
$I_p = A_1 \exp(-t/\tau_{d1})$	$\tau_{d1} = 1,36 \text{ мс}$

Деконволюция свертки. ИАГ



Керамика ИАГ

Измеренный сигнал свертки U_R (a) и его деконволюция I_p (b) **собственной полосы** люминесценции **при 350 нм** в керамических образцах ИАГ

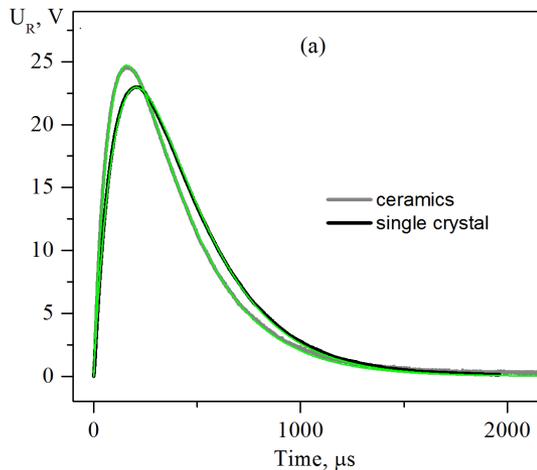
Аппроксимационная кривая	Времена затухания
$I_p = A_1 \exp(-t/\tau_{d1}) + A_2 \exp(-t/\tau_{d2})$	$\tau_{d1}=0,19$ мкс; $\tau_{d2}=2,42$ мкс

Прямая аппроксимация свертки U_R

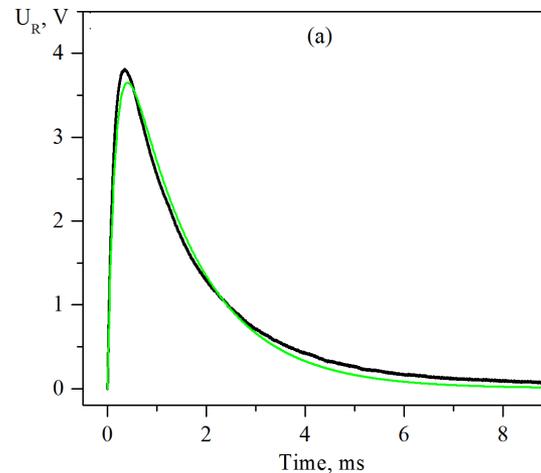
$$I_p = I_{p0} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \right] \quad (4)$$

$$U_R = RI_{p0} \left\{ \frac{\tau_{d1}}{\tau_a - \tau_{d1}} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \right] + \frac{\tau_{d2}}{\tau_a - \tau_{d2}} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

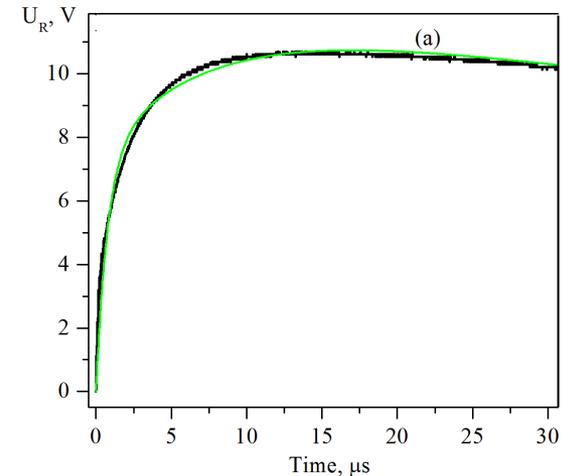
Nd:ИАГ (1064 нм)



Cr:ИАГ (687,4 нм)



ИАГ (350 нм)



Монокристаллы

I_p	U_R	отклон.
$\tau_{d1}=244$ мкс	$\tau_{d1}=252$ мкс	3,3 %

Керамика

I_p	U_R	отклон.
$\tau_{d1}=264$ мкс	$\tau_{d1}=268$ мкс	1,5 %
$\tau_{d2}=87$ мкс	$\tau_{d2}=90$ мкс	3,4%

Монокристалл

I_p	U_R	отклон.
$\tau_{d1}=1,36$ мс	$\tau_{d1}=1,41$ мс	3,7 %

Времена, полученные для свертки U_R , отличаются от времен, полученных для деконволюции I_p , по величине в 3-4 раза.

Прямая аппроксимация в данном случае не пригодна для точной оценки времен, но может предоставить оценочные значения.

Заключение

I. Сигнал с осциллографа U_R представляет собой свертку двух сигналов – импульса фототока I_p с кинетической аппаратной функцией измерительной цепи. Для восстановления сигнала фототока I_p необходимо провести операцию деконволюции.

$$U_R = \frac{R}{\tau_a} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \int_0^t I_p(t') e^{\frac{t'}{\tau_a}} dt'$$



$$I_p = \frac{\tau_a}{R} \left(\frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{\tau_a} \right)$$

II. В случае, когда известен механизм затухания люминесценции и он является линейным, для оценки времен затухания люминесценции можно использовать сигнал, полученный с осциллографа, при этом учитывая кинетическую аппаратную функцию.

III. На примере беспримесных и допированных керамических и монокристаллических образцов иттрий-алюминиевого граната показано, что предлагаемый токовый режим работы ФЭУ с мегаомным сопротивлением нагрузки можно успешно использовать для оперативной регистрации кинетики слабых световых сигналов.

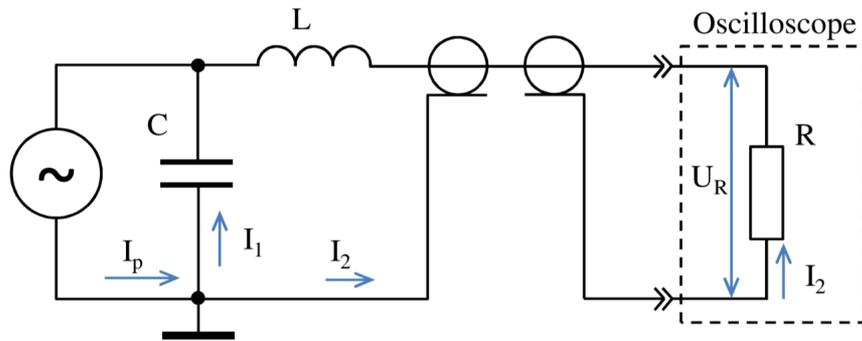


Российская академия наук
Уральское отделение



Спасибо за внимание!

Выражение фототока I_p через падение напряжения на сопротивлении U_R



$$I_p = I_1 + I_2 \quad (1)$$

$$I_1 = I_c = C \frac{dU_c}{dt} \quad (2a) \quad I_2 = I_R = I_L = \frac{U_R}{R} \quad (2b)$$

$$U_C = U_R + U_L \quad (3)$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_C dt; \quad U_R = I_R \cdot R; \quad U_L = L \frac{dI_L}{dt} = L \frac{d(\frac{U_R}{R})}{dt} = \frac{L}{R} \cdot \frac{dU_R}{dt} \quad (4)$$

$$(4) \rightarrow (3) \text{ и } \frac{d}{dt} \Rightarrow I_C = C \frac{dU_R}{dt} + \frac{CL}{R} \cdot \frac{d^2 U_R}{dt^2} \quad (5)$$

$$(5) \text{ и } (2b) \rightarrow (1) \Rightarrow I_p = \frac{CL}{R} \cdot \frac{d^2 U_R}{dt^2} + C \frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{R} \quad (6)$$

Решение уравнения I_p относительно измеряемого сигнала U_R

$$I_p = \frac{CL}{R} \cdot \frac{d^2 U_R}{dt^2} + C \frac{dU_R}{dt} + \frac{U_R}{R}$$

НЛДУ с заменой

$$Cy' + \frac{1}{R}y = I_p \quad (y' = \frac{dU_R}{dt}; y = U_R)$$

Метод вариации:

I. Решаем ОЛДУ

$$Cy' + \frac{1}{R}y = 0 \Rightarrow \ln|y| = -\frac{1}{\tau_a}t + C^* \text{ или } y = \check{C}e^{-\frac{t}{\tau_a}} \quad (\tau_a = RC)$$

II. Делаем замену

$$\check{C} = v(t) \Rightarrow y = ve^{-\frac{t}{\tau_a}} \text{ и } y' = v'e^{-\frac{t}{\tau_a}} - \frac{1}{\tau_a}ve^{-\frac{t}{\tau_a}}$$

III. Подставляем (II) в НЛДУ

$$\Rightarrow Cv'e^{-\frac{t}{\tau_a}} = I_p \Rightarrow v = \frac{1}{C} \int I_p(t)e^{\frac{t}{\tau_a}} dt$$

IV. Подставляем (III) в $y = U_R = ve^{-\frac{t}{\tau_a}}$

$$\Rightarrow U_R = \frac{1}{C} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \int I_p(t)e^{\frac{t}{\tau_a}} dt$$

$$f(t, t') = \exp[-(t - t')/\tau_a]$$

$$U_R = \frac{R}{\tau_a} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \int_0^t I_p(t')e^{\frac{t'}{\tau_a}} dt'$$

Кинетическая аппаратная функция измерительной цепи

Свертка двух сигналов – импульса фототока I_p с КАФ

Параметры работы элементов установки

Осциллограф Keysight DSOX2014A:

Входное сопротивление $R=1\text{ M}\Omega$
Временное разрешение 10 нс
Входная емкость $C_{osc} \leq 11\text{ пФ}$

Коаксиальный кабель:

Волновое сопротивление $R=50\ \Omega$
Длина $l=1,5\text{ м}$

ФЭУ-100:

Емкость измерительной цепи с учетом паразитных емкостей ФЭУ и кабеля $C=159,9\pm 0,1\text{ пФ}$
Индуктивность измерительной цепи $L=400\text{ нГн}$

ФЭУ-62:

Емкость измерительной цепи с учетом паразитных емкостей ФЭУ и кабеля $C=165,1\pm 0,1\text{ пФ}$
Индуктивность измерительной цепи $L=415\text{ нГн}$