



Физическая модель формирования одноэлектронного фотоотклика в микropиксельных лавинных фотодиодах

З.Садыгов, Х.Абдуллаев, Г.Ахмедов, Ф.Ахмедов, В.Жежер,
Ф.Зеррок, Р.Мухтаров, А.Садыгов, А.Сиделев, А.Титов,
С. Хорев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна,
Россия

Всероссийский НИИ автоматики, Москва, Россия

Zecotek Imaging Systems, Singapore

E-mail: zsadygov@gmail.com ; zsadygov@zecotek.com



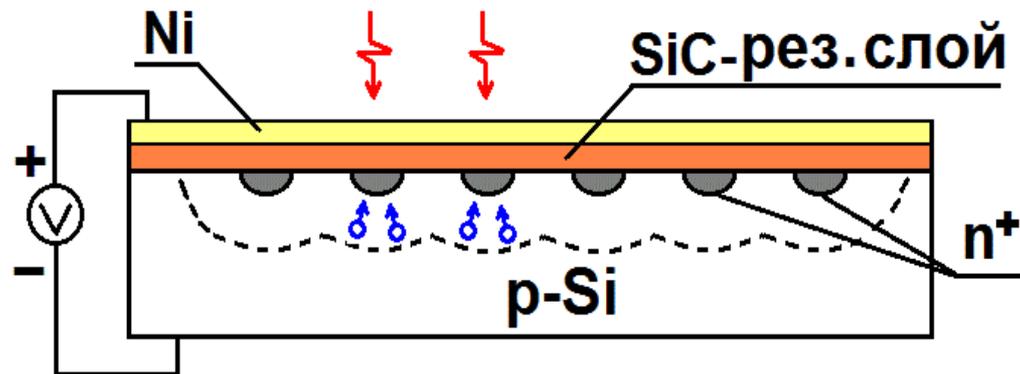
Содержание

- **Конструкции и принципы работы микропиксельных ЛФД (МЛФД)**
- **Необходимость модели МЛФД**
- **Описание модели формирования однофотонного импульса**
- **Результаты расчета параметров МЛФД и сравнение их с экспериментальными данными**
- **Выводы**

Создание новых ЛФД

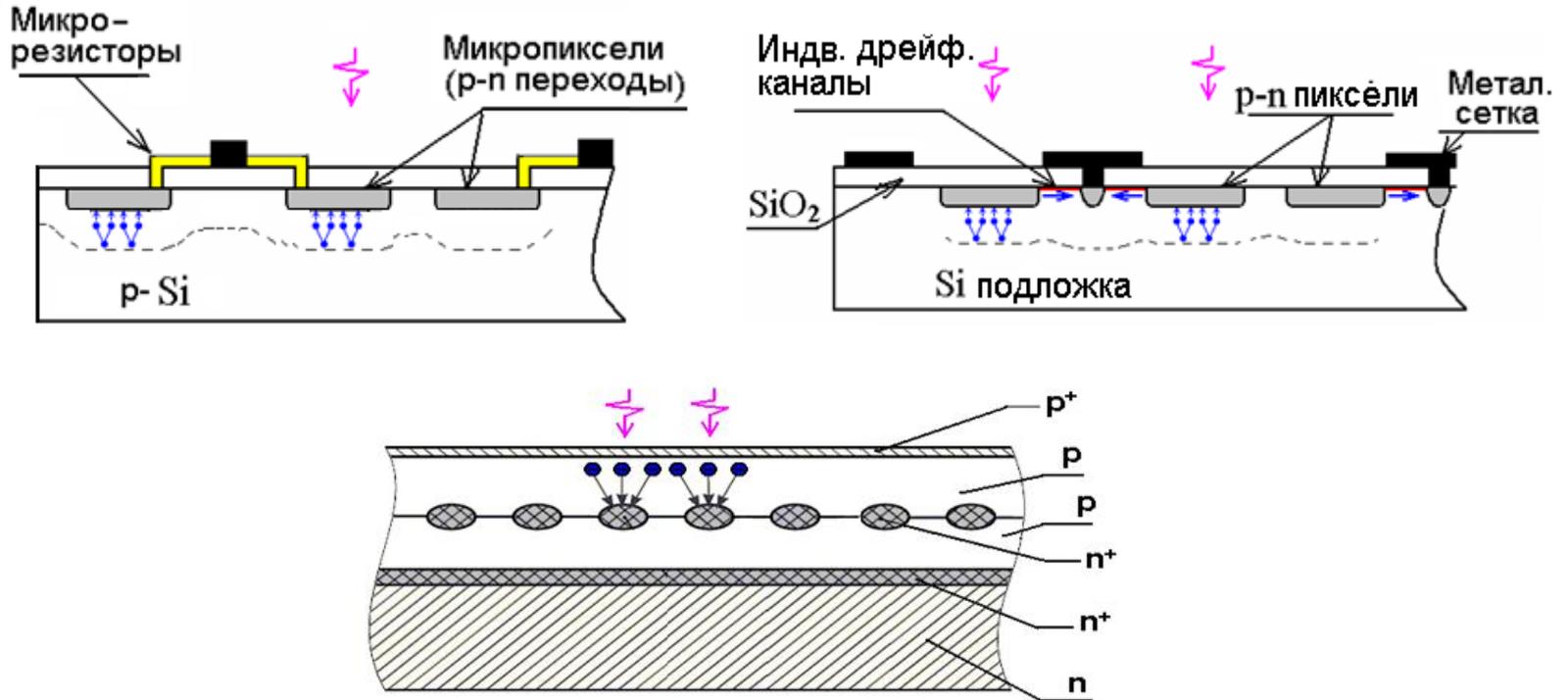
Исследования лавинного процесса в кремниевых структурах, проводимые группой разработчиков (А. Гасанов, В. Головин, З. Садыгов и Н. Юсипов) в период с 1982 по 1992 годы позволили создать полупроводниковые аналоги ФЭУ – микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД) в России.

На основе МРП (металл-резистивный слой-полупроводник) структуры был разработан новый лавинный фотодиод с уникальными параметрами: $M \sim 10^4$, $S \sim 10 \text{ мм}^2$



Гасанов А.Г., Головин В.М., Садыгов З.Я., Юсипов Н.Ю.
 Письма в ЖТФ, 1988, т.14, в.8, с.706-709 и 1990, т.6, в.1, с.14-17.

Три перспективных конструкций МЛФД



З.Садыгов. Патент России № 2102820, приоритет от 10.10.1996.

З.Садыгов. Патент России № 2086047, приоритет от 05.30.1996.

З.Садыгов. Патент России № 2316848, приоритет от 01.06.2006.



Необходимость модели

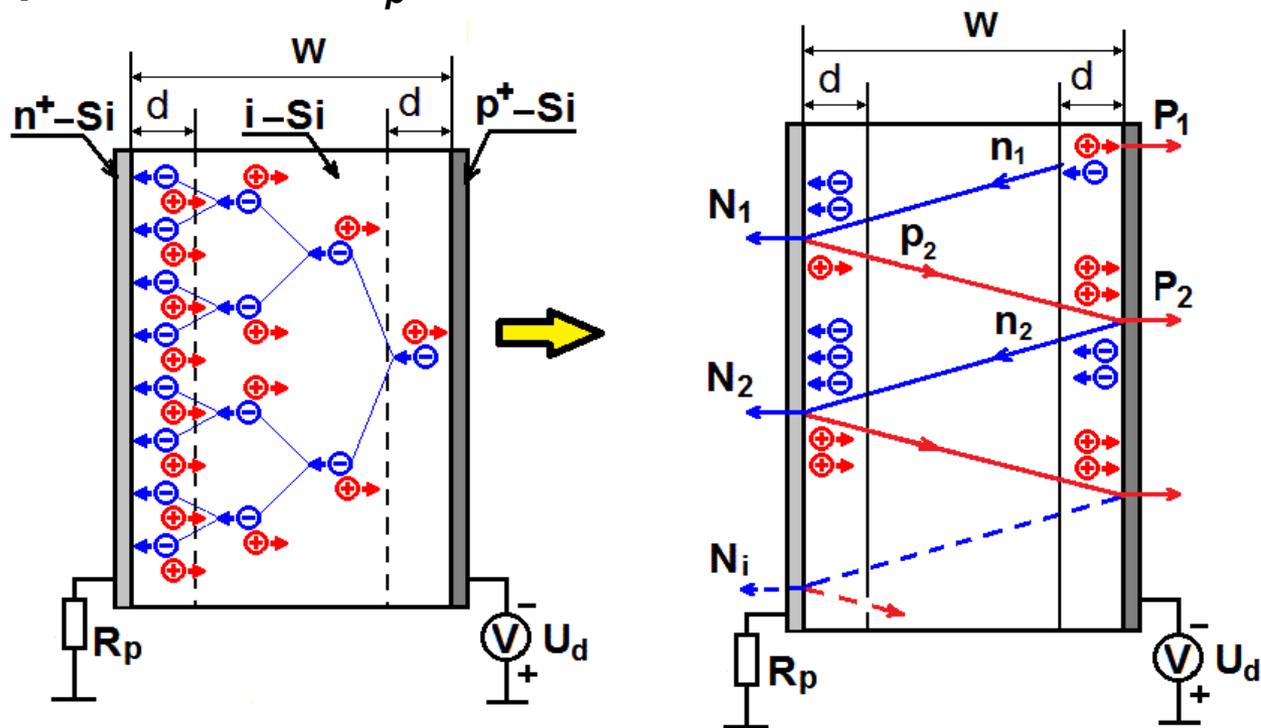
В настоящее время МЛФД посвящены много экспериментальных и теоретических работ. Однако все еще не создана адекватная физическая модель развития и гашения лавинного процесса в пикселях МЛФД.

Большинство предложенных моделей основываются на эквивалентных электрических схемах прибора, не учитывающих характер лавинного процесса, происходящего внутри пикселей.

В данной работе предлагается физическая модель работы МЛФД, учитывающая особенности лавинного процесса в полупроводнике прибора.

Обоснование модели

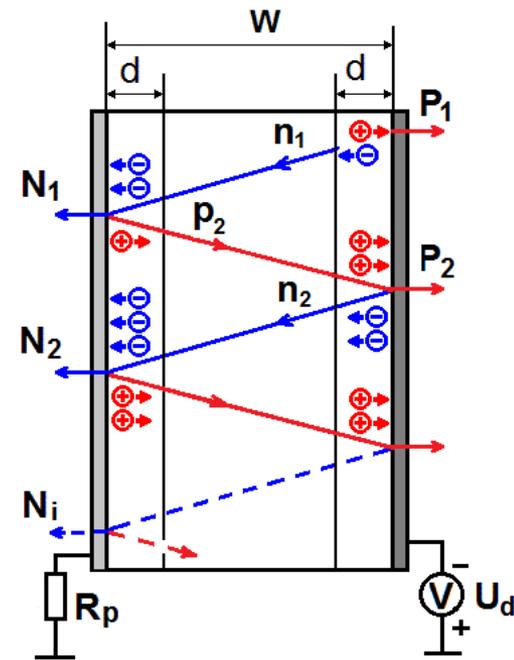
Для описания характеристик прибора достаточно рассмотреть работу одного пикселя. Ниже один пиксель МЛФД со своим индивидуальным сопротивлением R_p .



Обоснование модели

Для определения коэффициентов усиления единичных электронов и дырок за один пролет через i - слой использованы известные выражения $M_e = \exp(\alpha W)$ и $M_h = \exp(\beta W)$, соответственно.

Здесь α – коэффициент ионизации для электронов, β – коэффициент ионизации для дырок.



Для учета зависимости α и β от электрического поля E были использованы известные аналитические выражения (С. А. Lee et al. Phys. Rev., 134, A761, 1964.):

$$\alpha(E) = 3,8 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{1,75 \times 10^6}{E}\right)$$

$$\beta(E) = 2,25 \times 10^7 \times \exp\left(-\frac{3,26 \times 10^6}{E}\right)$$



Обоснование модели

Количество электронов N_1 , ушедших в анод, количество дырок p_1 , двигавшихся в сторону катода, а также величину поля E_1 при котором происходит лавинный процесс, можно выразить как

$$N_1 = \exp(\alpha_1 W), \quad p_1 = [\exp(\alpha_1 W) - 1], \quad E_1 = (U_1/W)$$

где $\alpha_1 = \alpha(E=E_1)$, $U_1 = U_d$ – напряжение между анодом и катодом пикселя перед началом первого цикла лавинного процесса.

Аналогично, количество электронов N_2 и величину поля E_2 можно выразить как

$$N_2 = [\exp(\alpha_1 W) - 1] \times [\exp(\beta_1 W) - 1] \times \exp(\alpha_2 W)$$

$$E_2 = \left(\frac{U_2}{W} \right) = \frac{1}{W} \times \left[U_1 - \frac{qN_1 - \frac{U_d - U_1}{R_p} \times 2\tau}{C_p} \right]$$



Обоснование модели

Таким образом, количество электронов N_i , стекавшихся в анодный электрод в результате i -го цикла и величину поля E_i можно выразить следующим образом

$$N_i = \left\{ \prod_{j=2}^i \left[\exp(\alpha_{j-1} W) - 1 \right] \times \left[\exp(\beta_{j-1} W) - 1 \right] \right\} \times \exp(\alpha_i W)$$

$$E_i = \left(\frac{U_i}{W} \right) = \frac{1}{W} \times \left[U_{i-1} - \frac{q N_{i-1} - \frac{U_d - U_{i-1}}{R_p} \times 2\tau}{C_p} \right]$$

Эти выражения позволяют моделировать следующие рабочие параметры МЛФД:

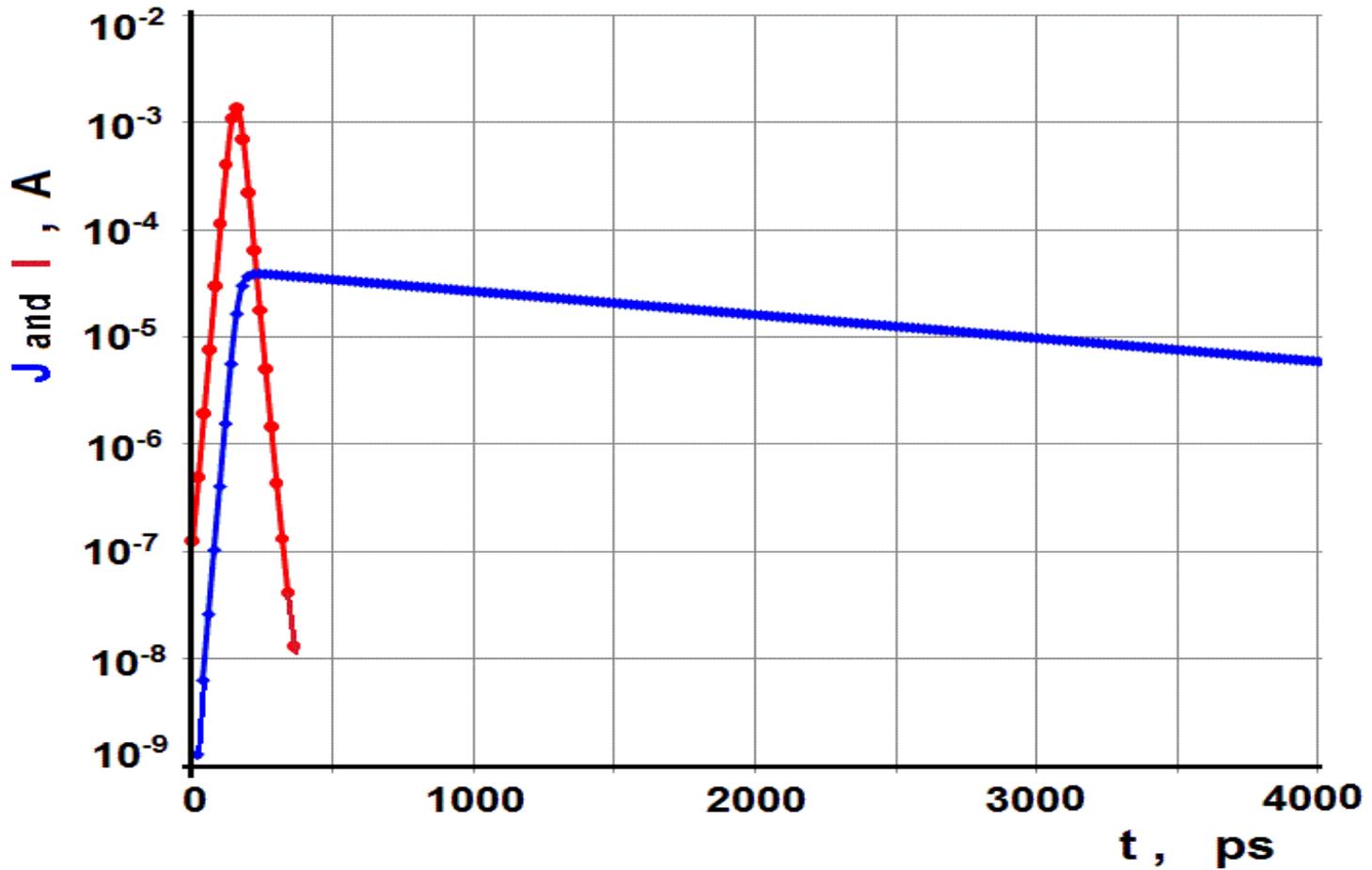
$$I_i(t_i) = q N_{i-1} / 2\tau \quad J_i(t_i) = (U_d - U_{i-1}) / R_p$$

$$M = N_1 + \sum_{i=2}^{\infty} N_i \quad t_i = (i - 1) \times 2\tau$$

В расчетах были использованы $C_p = 20 \text{ fF}$, $R_p = 200 \text{ k}\Omega$ и $\tau = (W/v) = 10 \text{ ps}$.

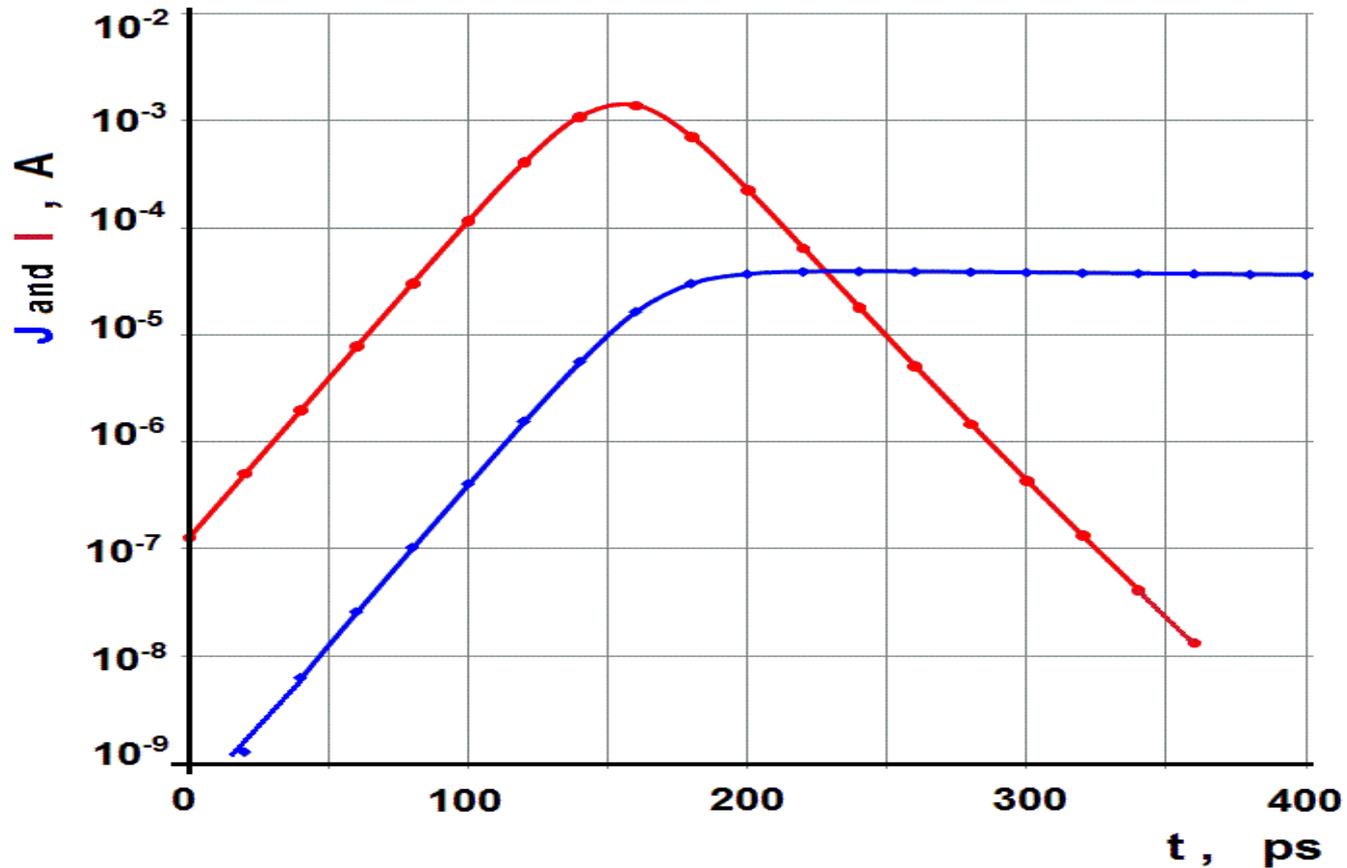


Результаты расчета параметров МЛФД : $I(in) \sim t$, $J(out) \sim t$



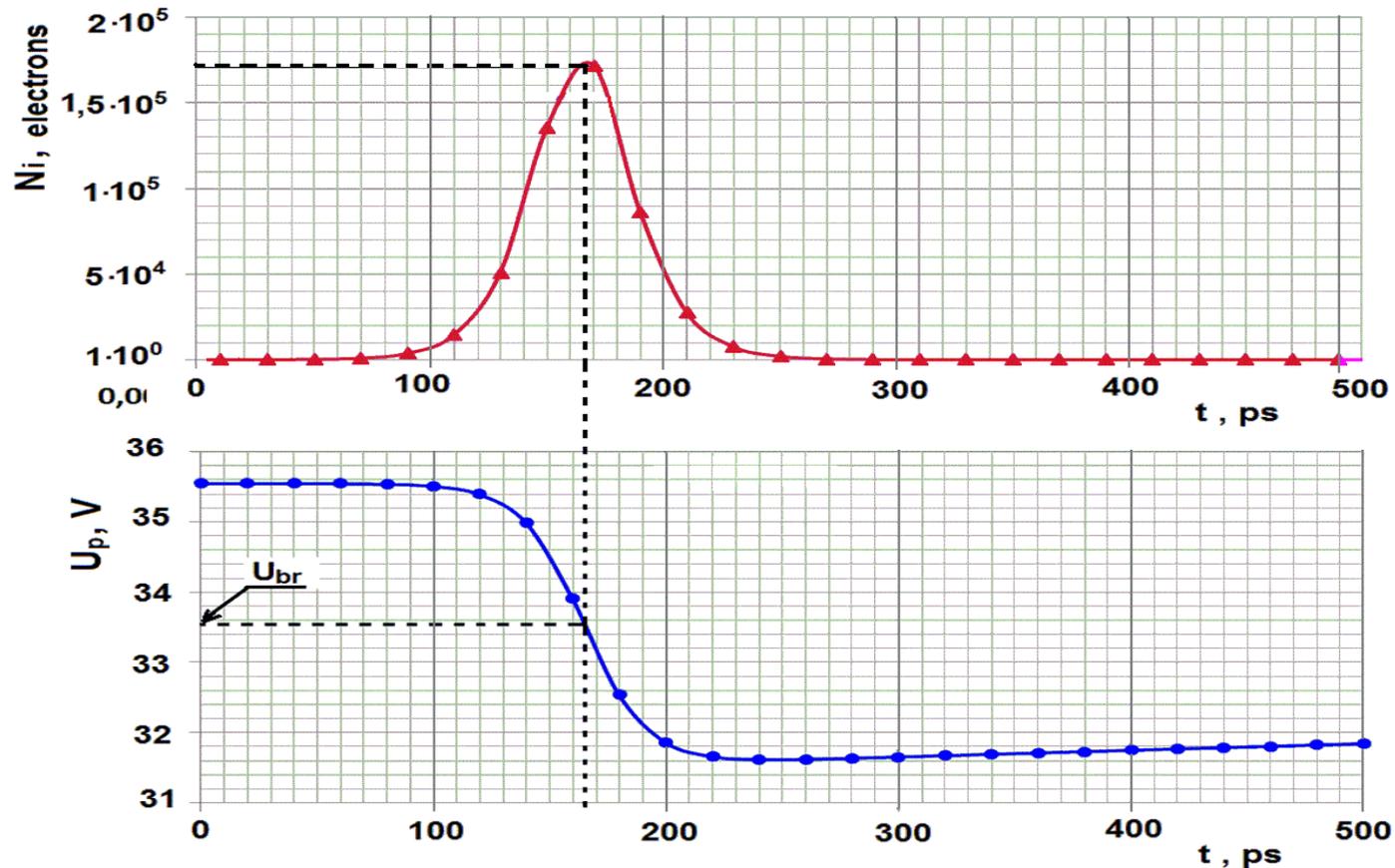


Результаты расчета параметров МЛФД : $I (in) \sim t$, $J (out) \sim t$





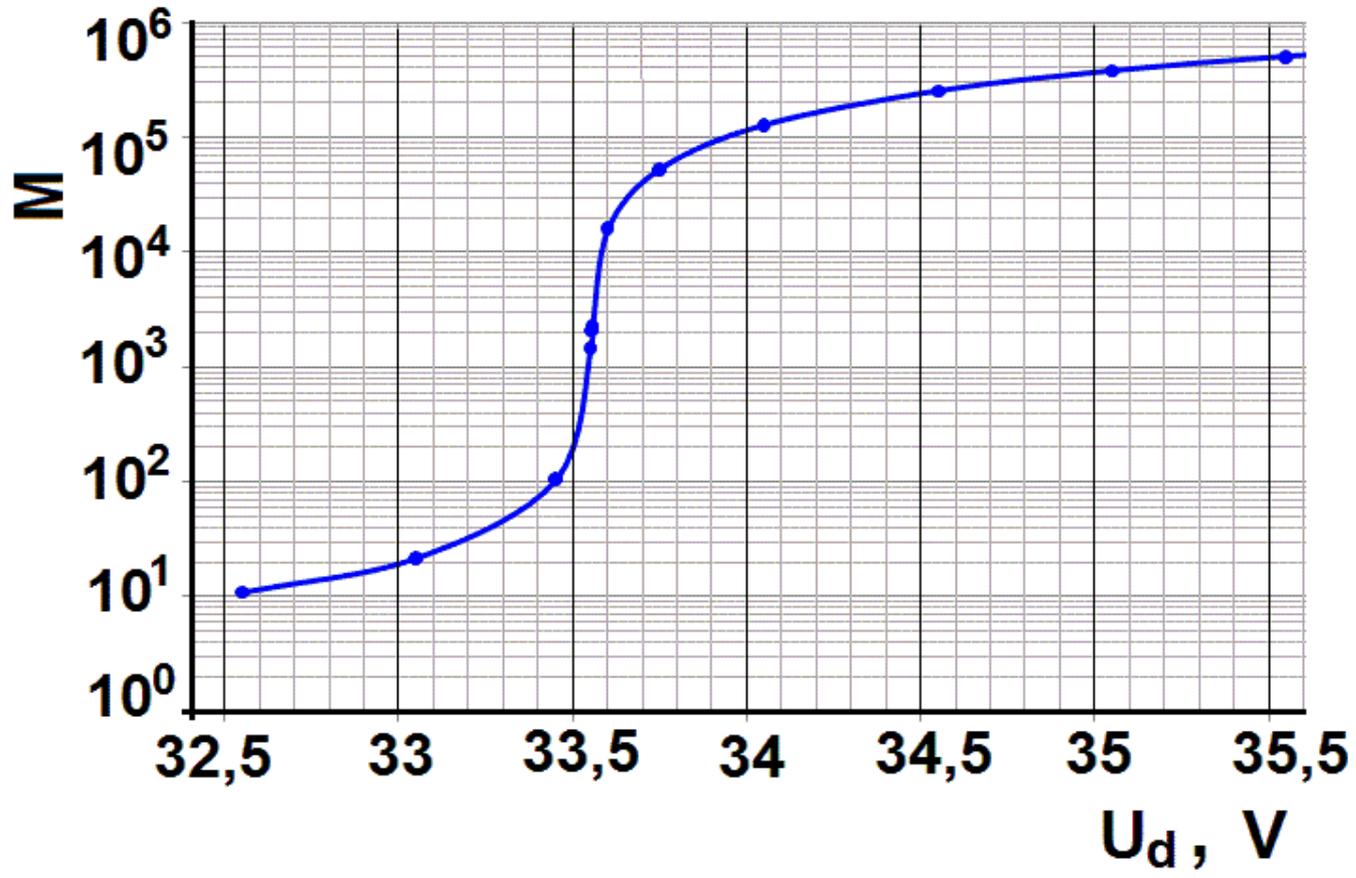
Результаты расчета параметров МЛФД : N_i (или I_i) $\sim t$, $U_p \sim t$



$$U_p - U_{br} = \Delta U \text{ – overvoltage; } U_p(\text{max}) - U_p(\text{min}) = 2 \cdot \Delta U$$

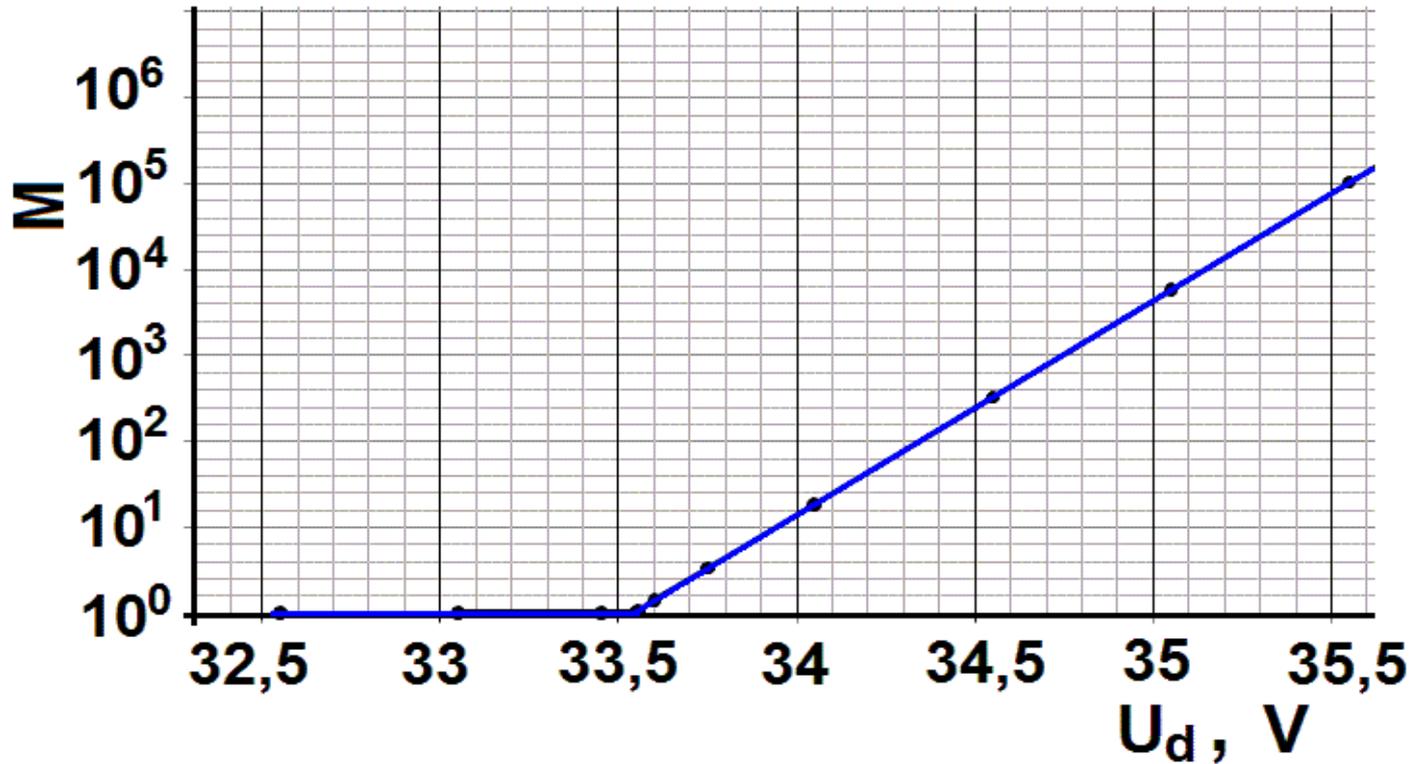


Результаты расчета параметров
МЛФД : $M \sim U_d$ (или $Q_e = M \cdot q \sim U_d$)



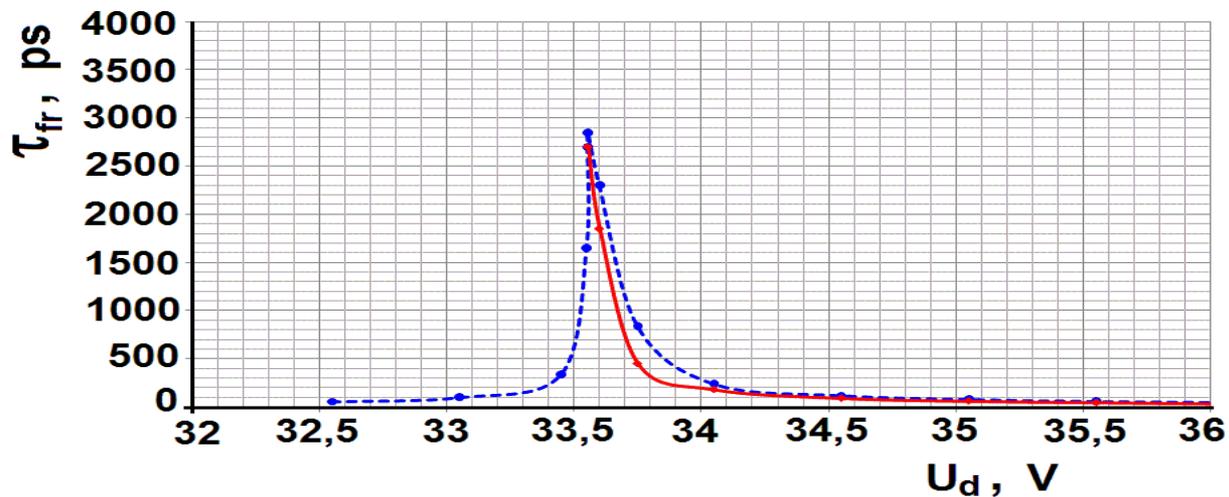
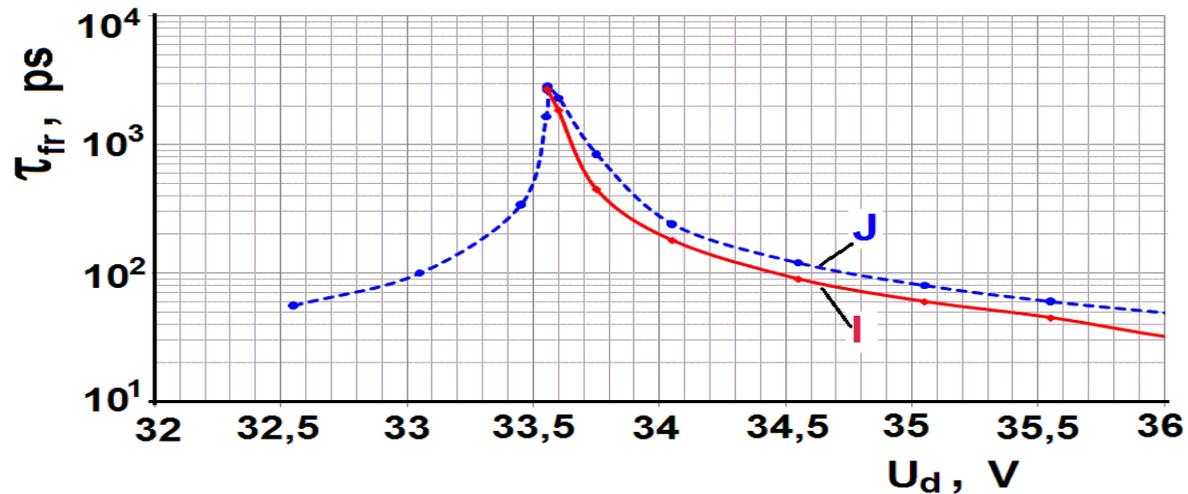


Результаты расчета параметров МЛФД : $M \sim U_d$ (или $Q_e = M * q \sim U_d$)

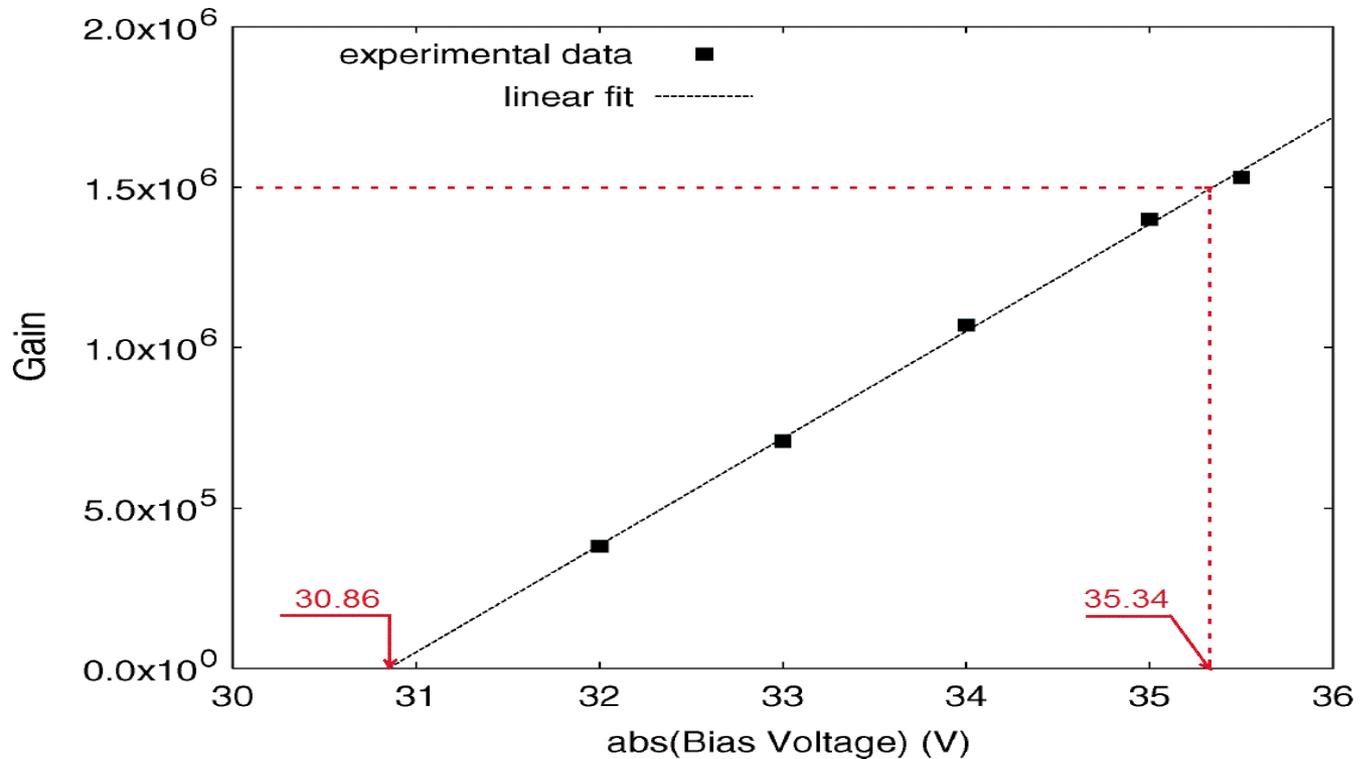


$$Q_e = q * M ; \quad C_{eff.} = \frac{\partial Q_e}{\partial V_p} = 40 f F = 2 * C_p$$

Результаты расчета параметров МЛФД : передний фронт $\sim U_d$



Сравнение с экспериментальными данными

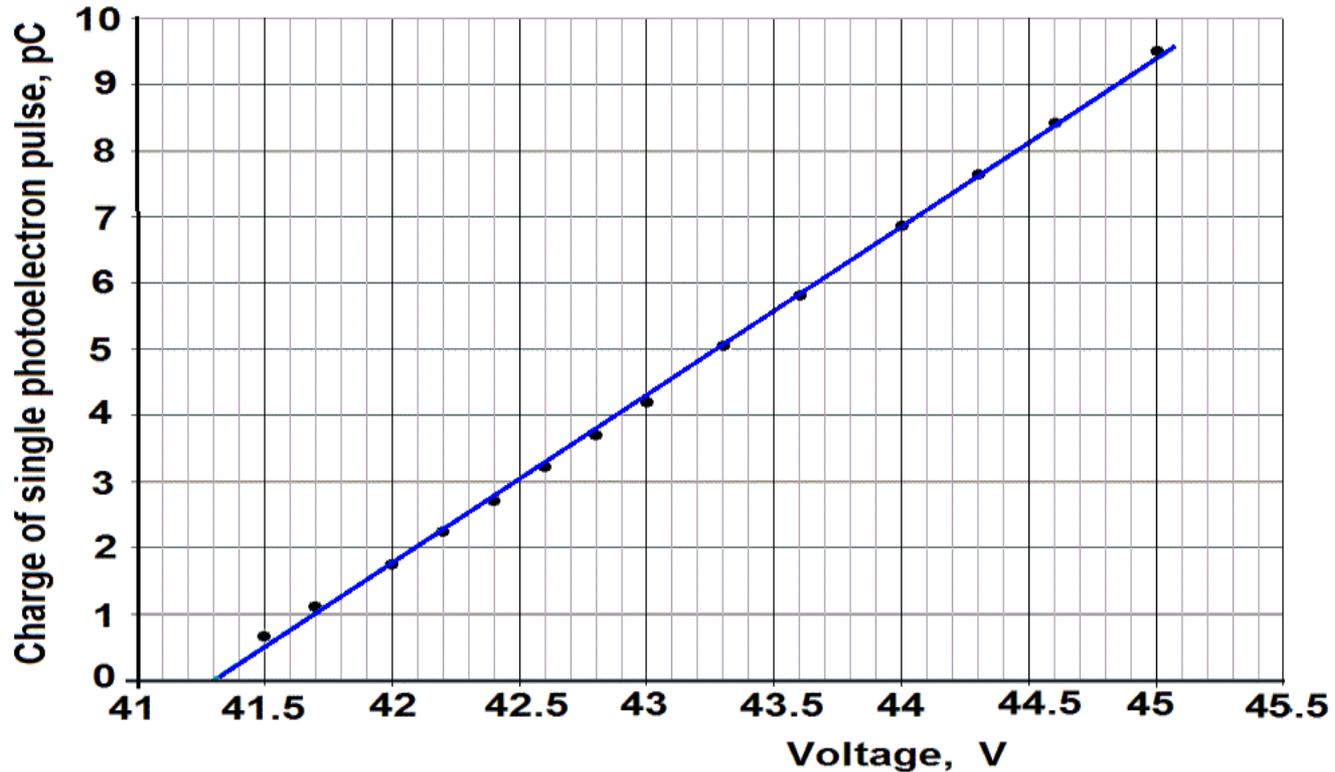


C. Piemonte et al., [IEEE Trans. on Nucl. Science 54 \(2007\) 236](#).

$$C_{eff.} = \frac{\partial Q_e}{\partial V_p} = 54 \text{ fF}. \text{ Однако, } C_p = 29 \text{ fF}, \text{ т.е. } C_{eff.} \sim 2 * C_p$$



Сравнение с экспериментальными данными



Однопиксельный МЛФД от фирмы Zecotek (Сингапур) с $C_p=1,3pF$. Обработка графика дает $C_{eff}=2,7pF \sim 2 \cdot C_p$



Выводы

1. Предложена физическая модель МЛФД, позволяющая исследовать основные параметры прибора.
2. Передний фронт снимаемого с МЛФД одноэлектронного сигнала повторяет форму внутреннего тока разрядки.
3. С ростом перенапряжения (overvoltage) длительность переднего фронта значительно уменьшается. При перенапряжении ~ 3 В можно получить фронт ~ 100 пс.
4. Величина разрядки пикселя МЛФД равна удвоенной величине перенапряжения: $U_p(\max) - U_p(\min) = 2 \cdot \Delta U$
5. Величина эффективной емкости, определяемой из зависимости “ $Q_e \sim U_d$ ” в 2 раза превышает реальную емкость пикселя.



Спасибо за внимание!