

Исследование пороговых характеристик лавинных МДП фотоприемников в режиме синхронного счёта фотонов.

Основными способами регистрации слабых световых сигналов (импульсов), являются:

- метод счёта фотонов - **МСФ**
- метод интегрирования тока - **МИТ**

Сравнение точности обоих методов, проведённое в /7,8/ показало, что существует такое значение мощности света, при котором упомянутые выше методы одинаково точны. С увеличением мощности света точнее метод интегрирования тока, а с уменьшением – метод счёта фотонов (**МСФ**).

МСФ, базирующийся на применении лавинных фотодиодов с р-п переходом (ЛФД), впервые описан в /9/, в дальнейшем /10/, было показано, что при комнатной температуре однофотонная регистрация при помощи ЛФД с р-п переходом неосуществима из-за малого значения коэффициента умножения и высокого уровня термогенерации и микроплазм, которые являются аналогом темновых импульсов ФЭУ. Регистрация отдельных фотонов (точнее фотоэлектронов) возможна только при температурах порядке 77 К.

Лавинные фотоприемники на основе МДП-структур (**ЛМДПФ**) обеспечивают высокое (до 10^5) значение коэффициента умножения фототока, относительно слабую зависимость коэффициента умножения от приложенного напряжения и являются, в настоящее время, единственными твердотельными фотоприемниками для регистрации слабых (на уровне десятков - сотен фотонов) световых импульсов в диапазоне длин волн 0,53 - 1,06 мкм.

Описание экспериментальной установки и методики исследований.

На рис. 2.1 представлена блок-схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования:

1. Амплитудного распределения напряжения шумов (АРШ) ЛМДПФ зависимости от электрического режима .
2. Амплитудного распределения импульсов фото сигнала (АРС) ЛМДПФ в зависимости от электрического режима на длине волны $\lambda = 0.53$ и $\lambda = 1.06$ мкм.
3. Работы ЛМДПФ в режиме синхронного счёта фотонов .

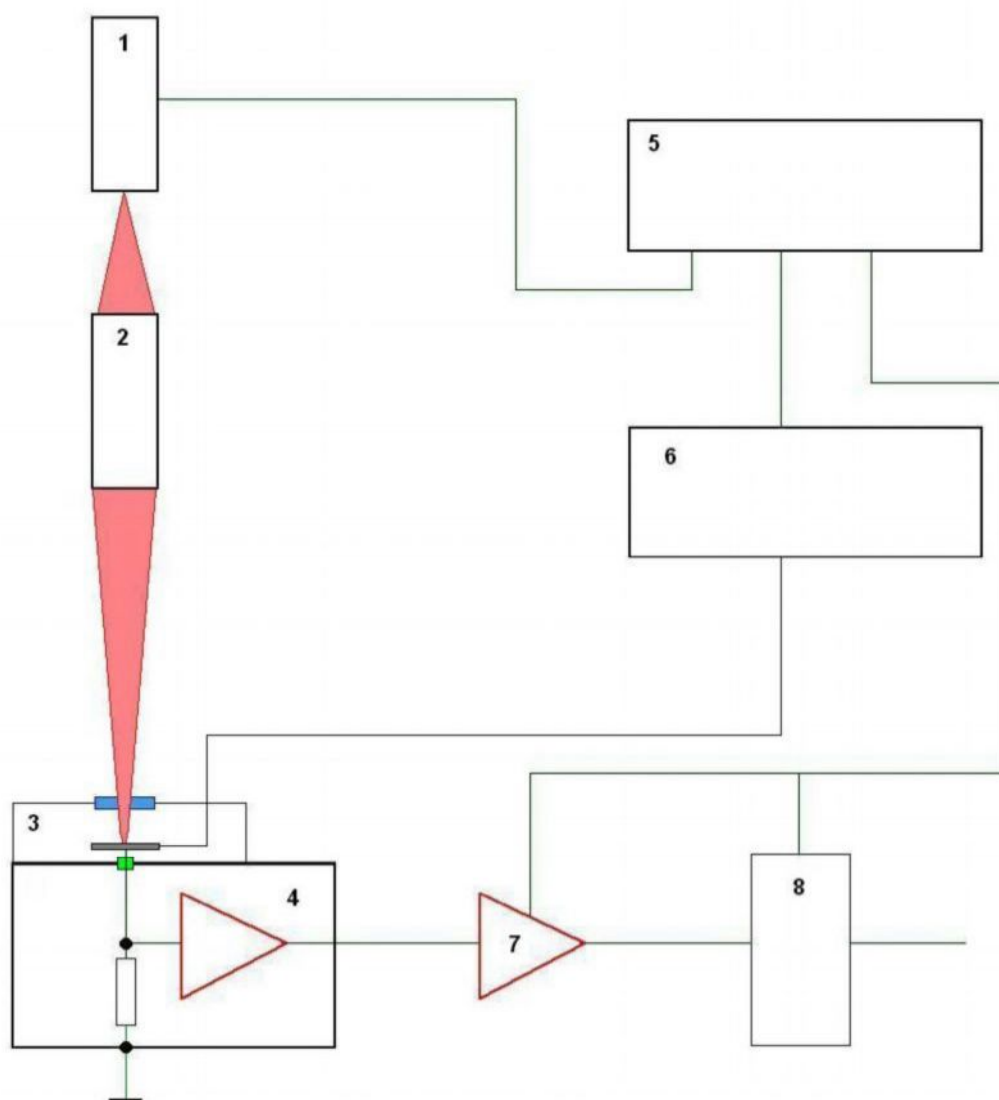


Рис. 2.1

На рис. 2.1 приняты следующие обозначения:

1. **ИИС** - импульсный источник света ($\lambda = 0,53; 0,67; 1,06$ мкм.)
2. Оптическая система (**ОС**), которая обеспечивает совмещение в поле зрения изображения исследуемого матричного 36 - элементного лавинного МДП-фотоприёмника и светового пятна от ИИС, что позволяет эффективно контролировать как точность совмещения, так и диаметр светового пятна. Диаметр светового пятна равен 100 мкм, необходимое ослабление света производится набором нейтральных светофильтров (**НС**).
3. Соединитель для подключения ЛМДПФ [Блоки 3 и 4 входят в состав ФПУ].

4. **ПУ** - предварительный широкополосный малошумящий. усилитель тока.
 - коэф. передачи - 68 кОм.
 - время нарастания / спада переходной характеристики - 2 нсек
 - среднеквадратичный шумовой ток (приведенный ко входу) - $3 \cdot 10^{-10}$ А / Гц
5. **БС** - блок синхронизации, служащий для выработки синхроимпульсов, необходимых для работы системы и служащий так же для питания ИИС импульсами тока регулируемой амплитуды и длительности.
6. **ПТН** - источник импульсного напряжения трапецеидальной формы, с регулируемыми временными и амплитудными параметрами выходных импульсов. (амплитуда до 200 В, крутизна переднего фронта 10^3 - 10^6 В/с).
 Точность формирования амплитуды трапецеидального импульса питания (ТИП) - 0.1%, линейность переднего фронта ТИП - не хуже 1 % .
7. **Д** - дискриминатор + основной усилитель - ключ, который служит для увеличения коэффициента усиления по напряжению и осуществления стробирования.
8. **МАО** - Многоканальный амплитудный анализатор & Счетчик импульсов.

Исследования проводились на 36-элементном ЛМДПФ.

1. Размеры элемента - 0,3x0,3 мм ;
2. Монохроматическая токовая чувствительность S_{λ} - 100;
3. Рабочее напряжение ТИП - 80 В.

ЛМДПФ помещен в герметичный корпус с прозрачным сапфировым окном.

В процессе эксперимента, для определения среднеквадратичного напряжения шумов и амплитудного значения фототока ЛМДПФ, использовался метод многоканального амплитудного анализа (МАО), позволяющий достичь высокой степени точности.

Проведенные нами исследования зависимости отношения сигнал/шум от режима электропитания впервые позволили определить предельные характеристики ЛМДПФ режиме синхронного счёта фотонов /11,12/, для достигнутого к 1984 г. уровня технологии изготовления (к сожалению, в 1989 г. технологические исследования ЛМДПФ были прекращены).

Экспериментальные результаты

В наших экспериментах, на многоканальном анализаторе импульсов фиксировались амплитудные распределения напряжения шумов (АРШ) и сигнала (АРС) в зависимости от амплитуды ТИП.

В режиме синхронного счёта фотонов регистрировалась «скорость счёта» в зависимости от количества фотонов в импульсе света.

Из АРШ определялось среднеквадратичное напряжение шумов U_n формуле:

$$U_n = \sqrt{\sum X^2 / \sum I_i} \quad (2.1)$$

Средняя амплитуда напряжения фото сигнала U_n из АРС по формуле:

$$U_c = \sum X_j n_j / \sum n_j \quad (2.2)$$

где: X - номер канала (амплитуда входного напряжения МАА);

n - число импульсов, накопленных в данном канале

$\sum n_j = \sum n_j = N$ - полное число импульсов

На рис. 2.3 приведены графики типичной зависимости амплитудного значения напряжения фотосигнала U_c , среднеквадратичного напряжения шумов $U_{ш}$ в выходе ФПУ и их отношения $\rho = U_c / U_{ш}$ от амплитуды ТИП.

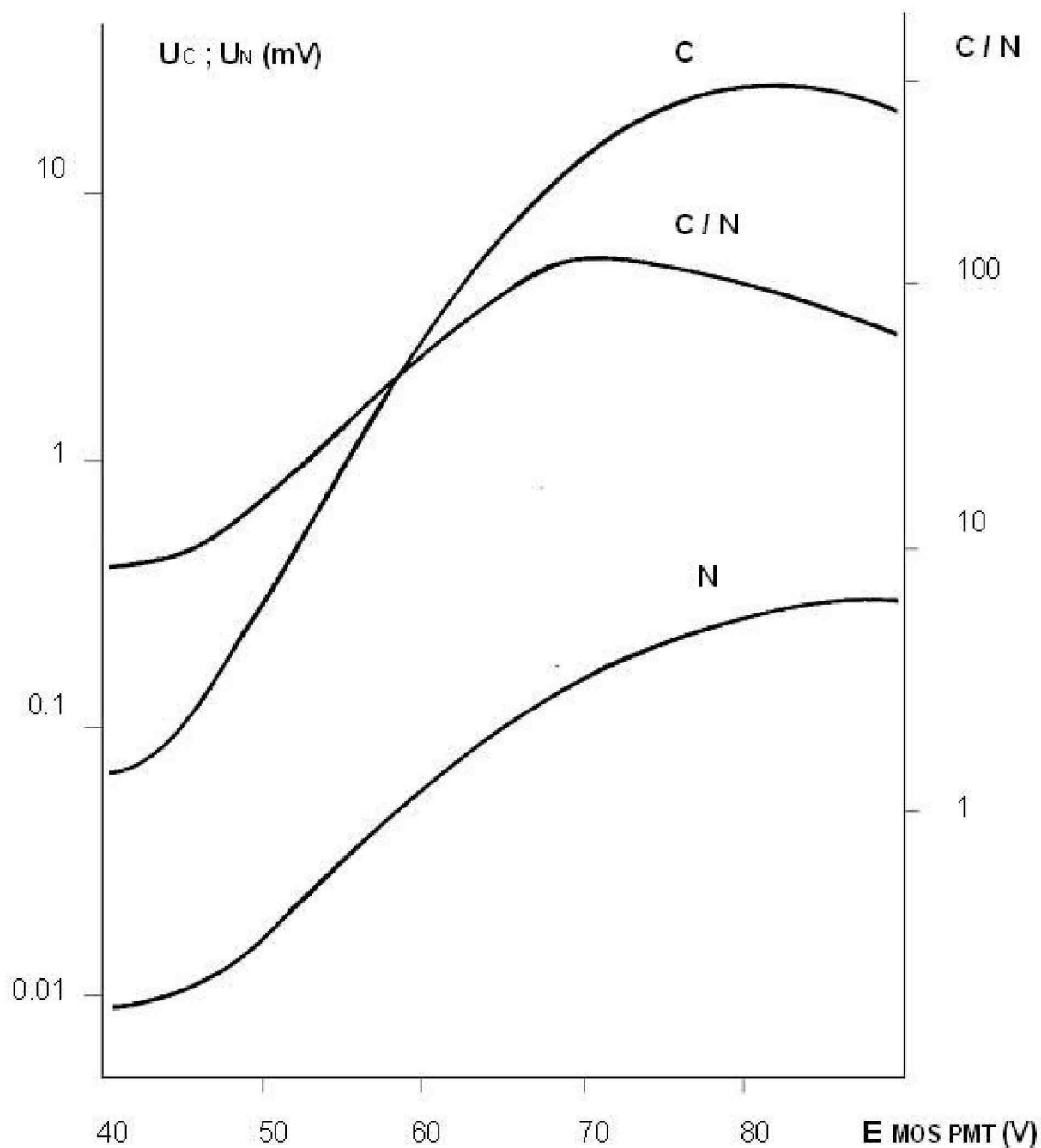


Рис. 2.3

Очевидно:

1. Имеется выраженный максимум зависимости отношения $C / Ш$ от значения ТИП.
 2. Максимальное значение отношения $C / Ш$ достигается при величине ТИП, близких к тем, при которых напряжение фотосигнала максимально.
- При настройке ФПУ достаточно установить ТИП по максимальному значению фотосигнала.

Используя данные рис. 2.3 и /11/ был выбран режим электропитания ЛМДФ, обеспечивающий максимальное отношение $C / \text{Ш}$ на выходе ФПУ.

В режиме синхронного счёта фотонов, при котором накопление отсчетов производится синхронно со временем прихода световых импульсов (в остальное время система регистрации заблокирована) от БС (рис. 2.1) синхронно со светом на вход стробирования дискриминатора Д подавались строб-импульсы длительностью - 0.5 мксек

Блок-схема экспериментальной установки для исследования пороговых характеристик ЛМДФ приведена на рис. 2.1,

Для определения оптимального уровня дискриминации было проведено исследование зависимости «скорости счёта» W на выходе ФПУ от P света, W_0 - среднее число темновых (шумовых) импульсов (рис. 2.5).

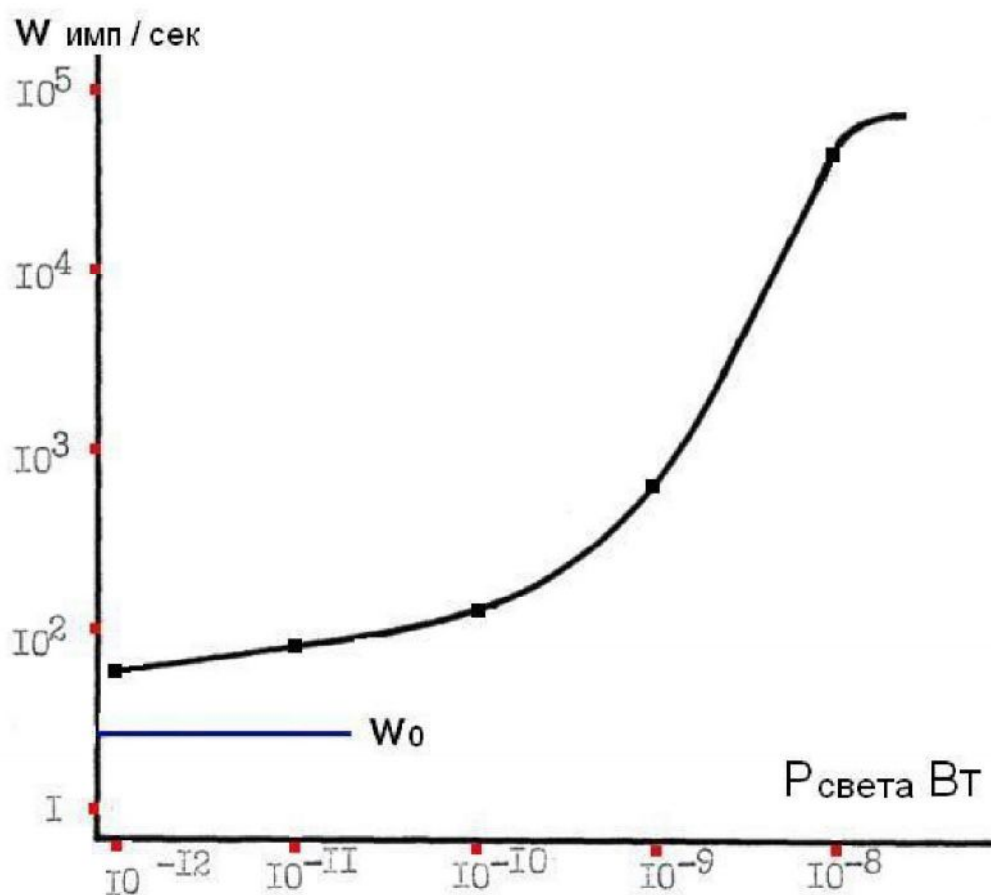


Рис. 2.5

Уровень дискриминации U_d при работе с ФПУ устанавливается так, чтоб отсекались темновые (шумовые) импульсы малой амплитуды.

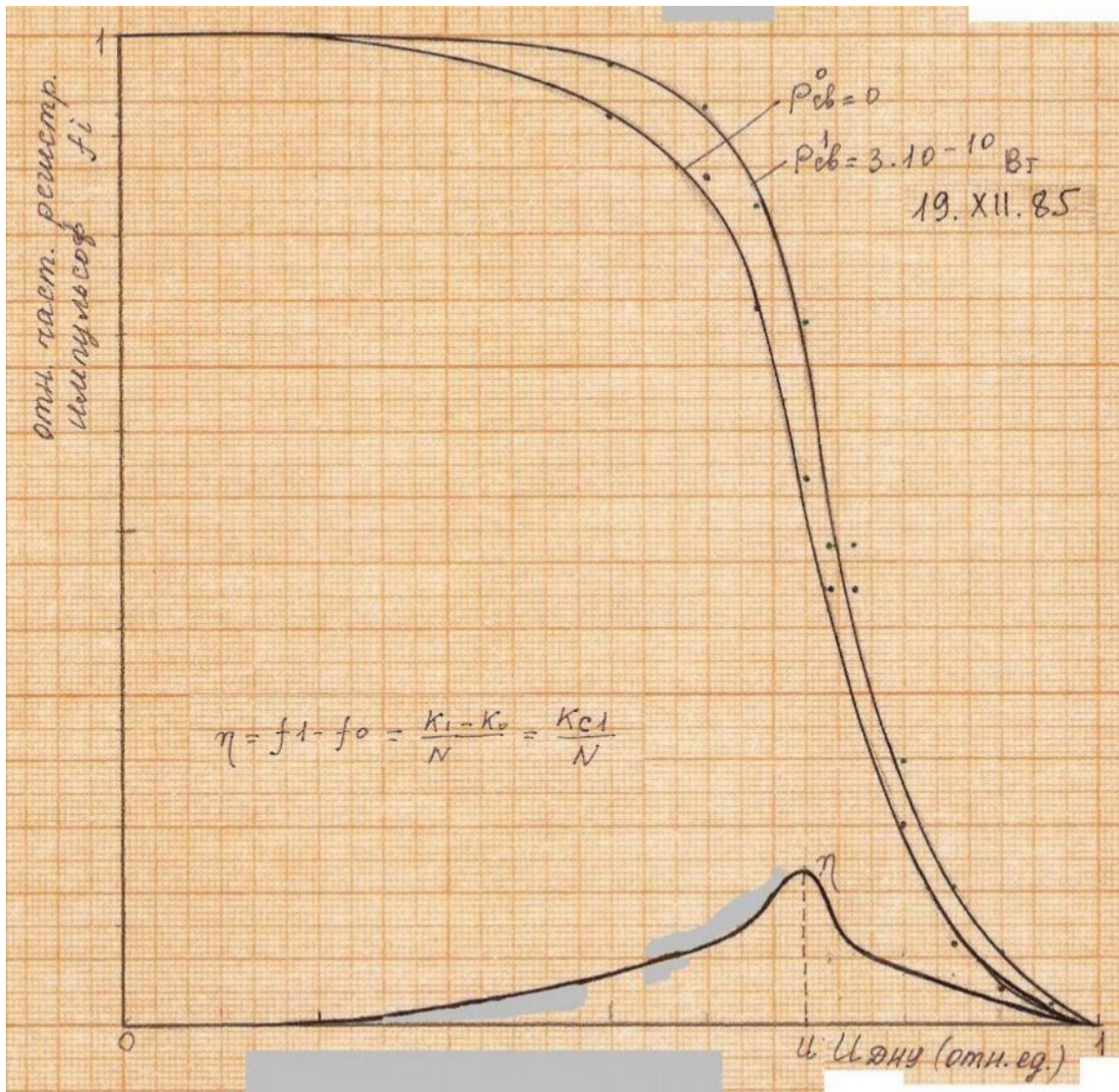


Рис. 2.6

Уровень дискриминации U_d устанавливается так, чтоб отсекались темновые (шумовые) импульсы малой амплитуды.

Оптимальный порог дискриминации которому соответствует максимальная вероятность регистрации света η , может быть определён также из графиков (рис. 2.6) зависимостей относительных частот регистрации световых F_1 и темновых F_2 импульсов от уровня дискриминации (их разность $F_1 - F_2 = \eta$).

Производился счёт превышающих порог дискриминации импульсов при разных мощностях света

(следовательно, при разном количестве фотонов в одном импульсе света).

После усреднения, для одинаковых измерений рассчитывалась средняя скорость счёта

$$\hat{W} = k / t$$

где:

k - среднее число подсчитанных импульсов; $T_n = t_{\text{изм.}} \times N$ - общее время наблюдения;

N - число циклов измерения. Темновая скорость счёта определяется аналогично

$$W_0 = k / t_n$$

При больших мощностях регистрируемых световых импульсов, когда $K_{\max} > N$, максимальная скорость счёта зависит от ширины полосы регистрирующей аппаратуры. В наших измерения $K_{\max} = 1,2 N$ поэтому, $W_{\max} = 2,4 \times 10^6$ имп/сек (рис. 2.7).

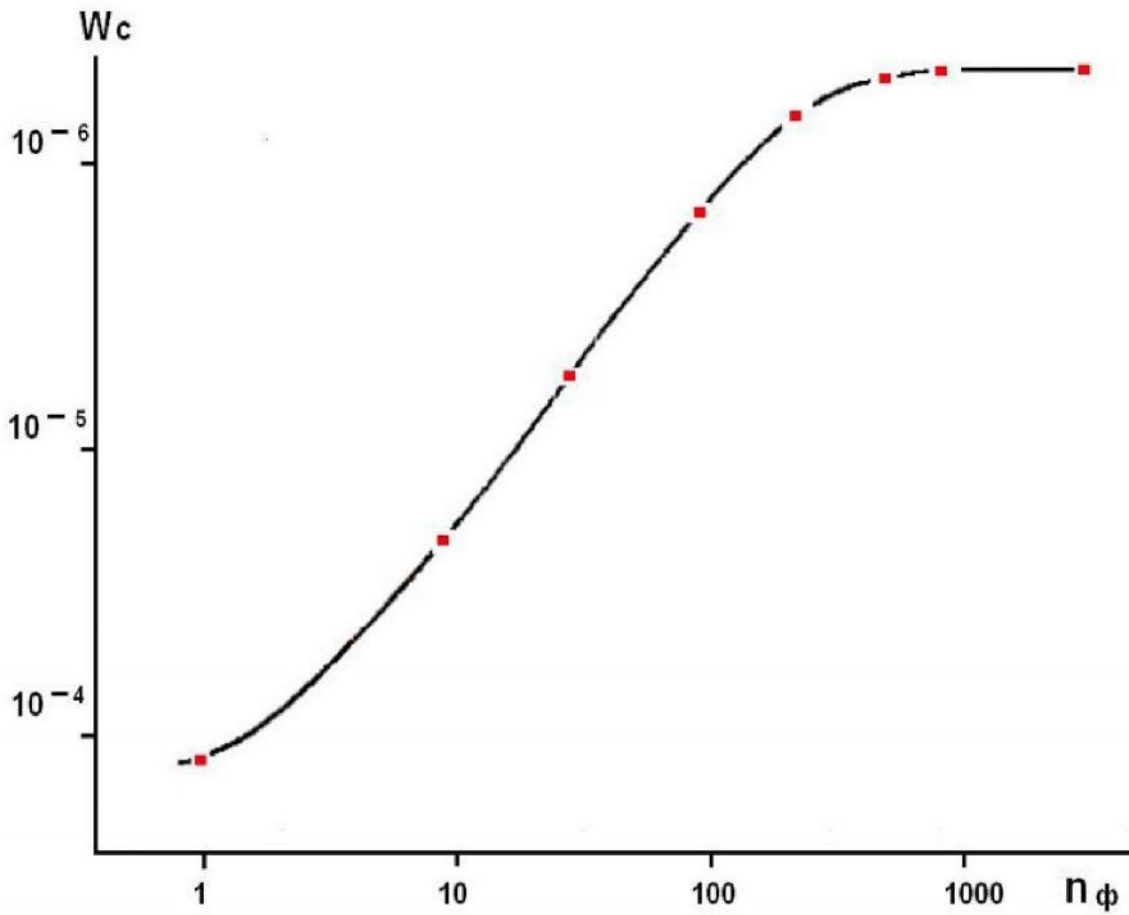


Рис. 2.6.1

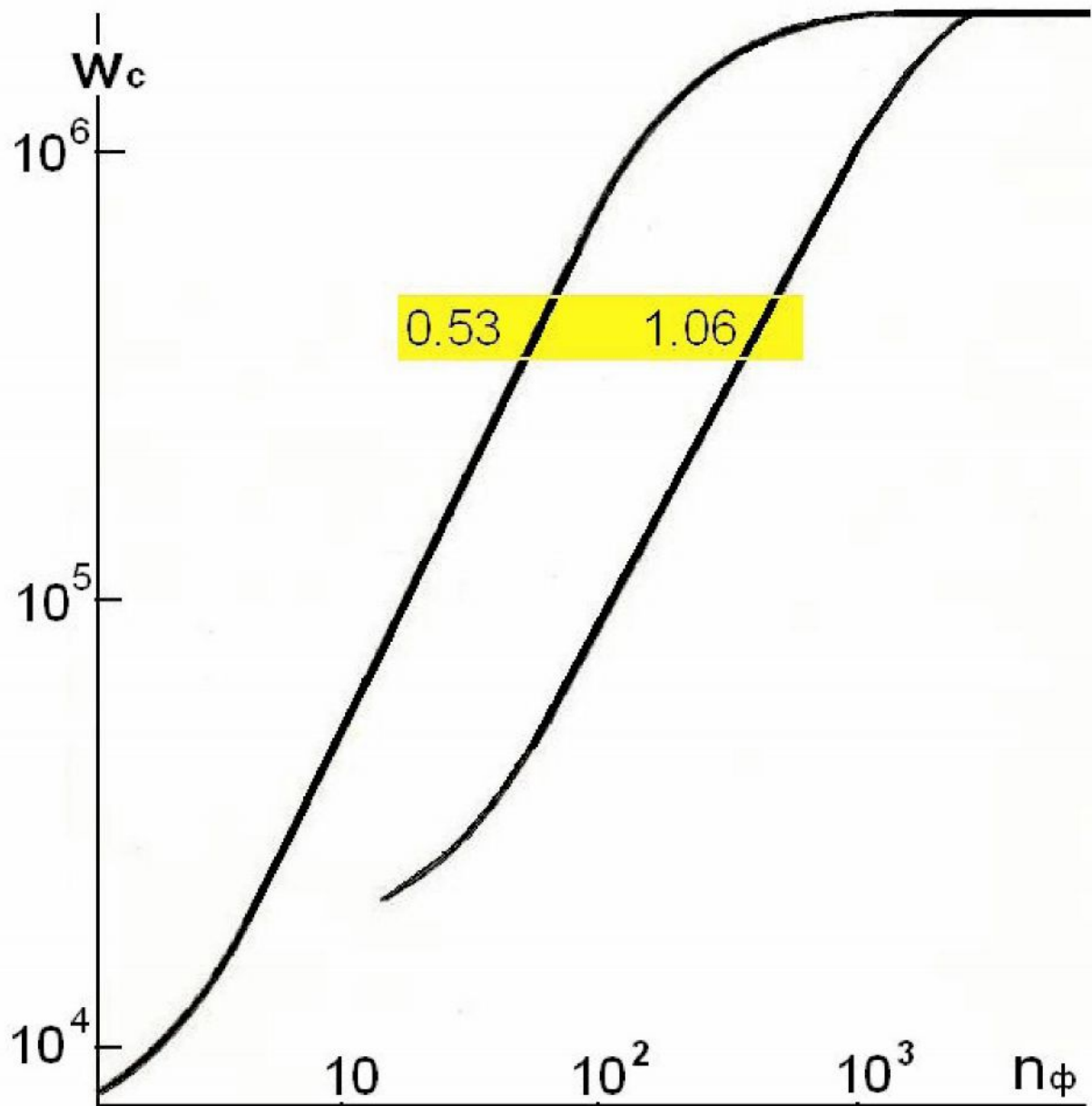


Рис.2.7

Среднеквадратичное отклонение показаний определяется (в предположении пуассоновской статистики сигналов на выходе ФПУ):

$$K_i = [(2W_c + 2W_c)t\eta]^{1/2}$$

Поэтому для расчета отношения сигнал/шум применимо выражение

$$\rho = K_c / \sqrt{K_c + 2K_0} \quad (2.4)$$

где:

K_0 - среднее число посчитанных темновых импульсов,

$K_c = K - K_0$ - среднее число посчитанных импульсов, обусловленных воздействием света.

График зависимости ρ (С / Ш) от мощности световых импульсов приведен на рис. 2.8 .

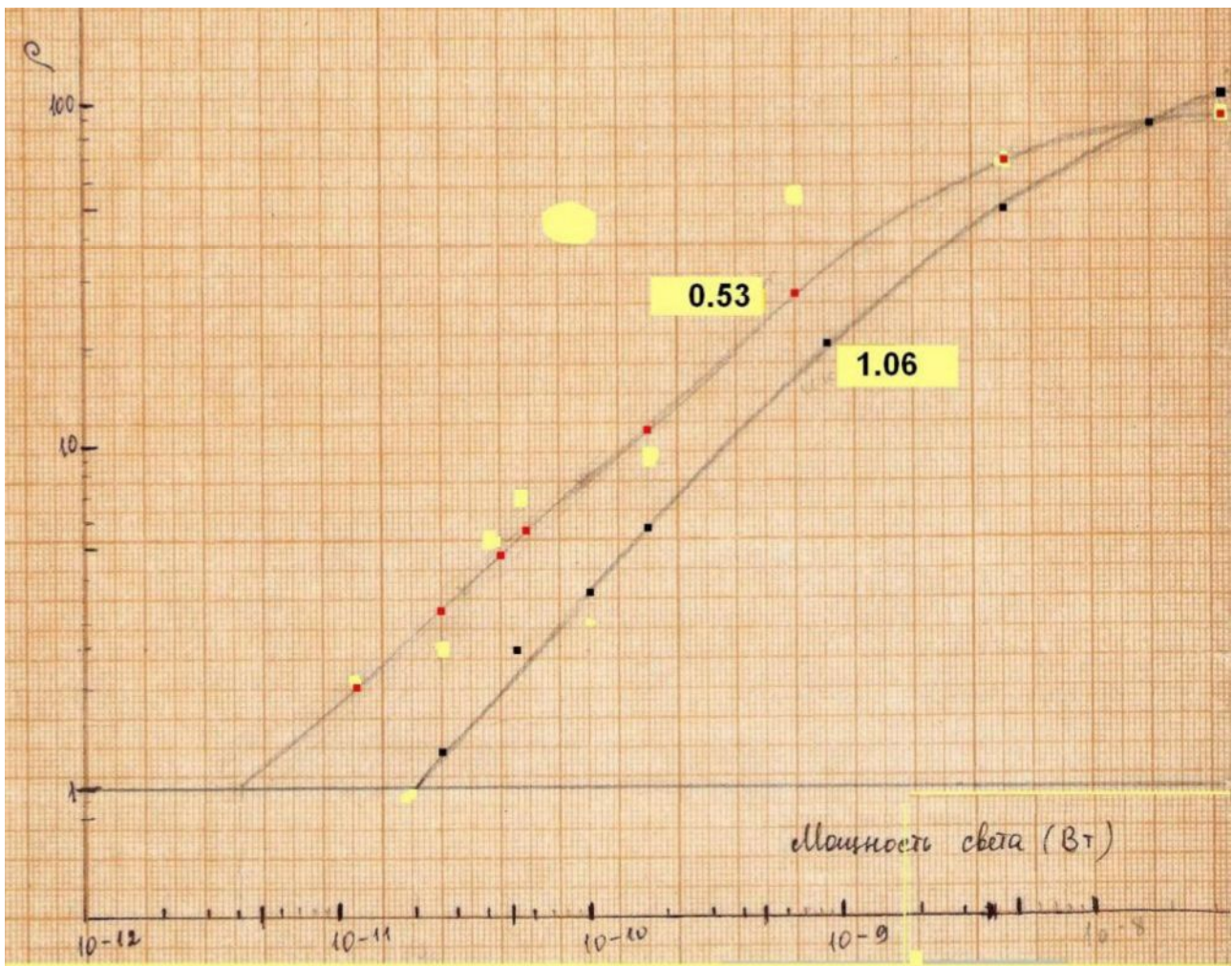


Рис. 2.8

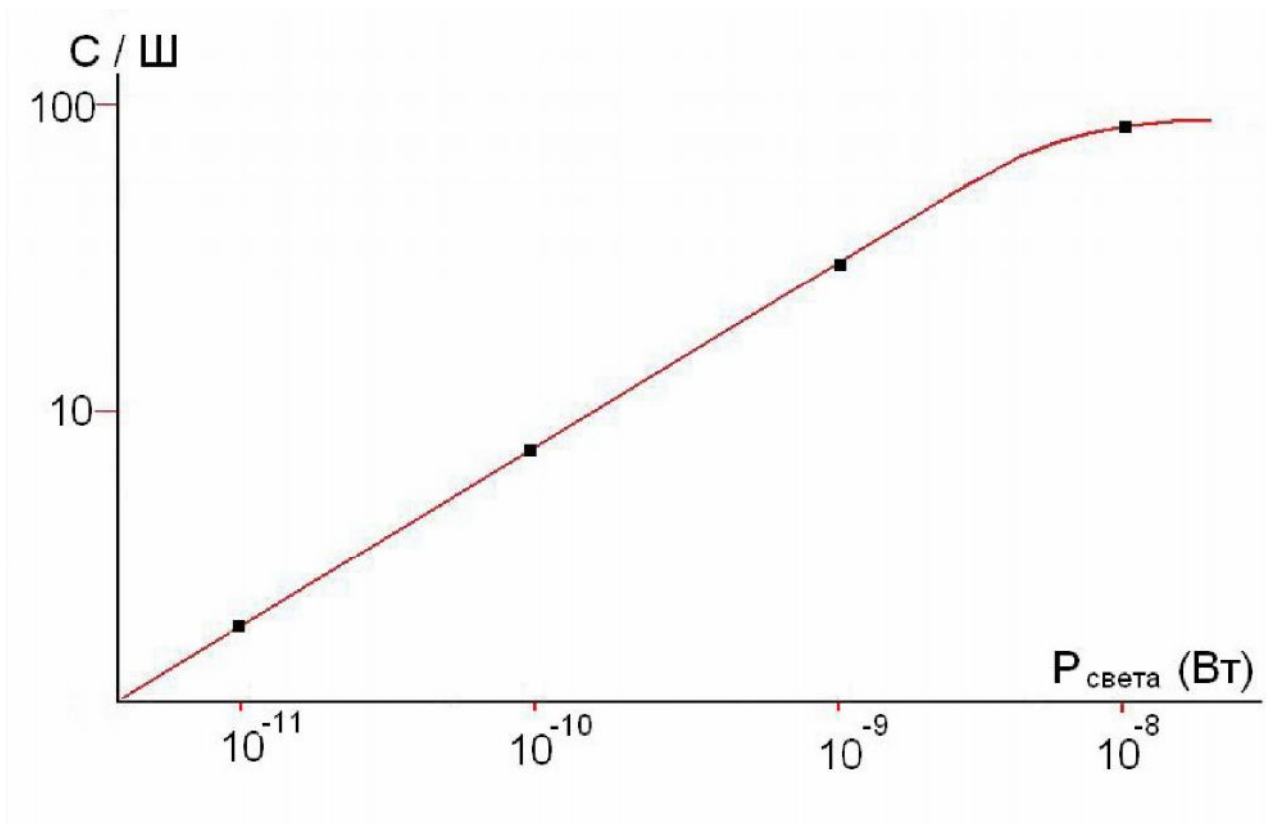


Рис.2.8.1

Из него можно определить пороговую мощность световых импульсов **P_{пор.}** на входе ФПУ, при которой отношение сигнал/шум $\rho=1$.

Полученные данные позволили рассчитать пороговую чувствительность (NEP) ЛМДПФ в режиме синхронного счета фотонов:

$$NEP = h\nu \sqrt{2W_0/rf} \quad (2.5)$$

где:

$h\nu$ - энергия фотона,

$\eta^* = K_c / N$ - вероятность регистрации фотона, при отношении сигнал/шум $\rho = 1$,

когда $K_c = (1 + \sqrt{1 + 8 K_0}) / 2$, согласно (2.4)

$NEP = 2.53 \cdot 10^{-15} \text{ Вт} / \sqrt{\text{Гц}}$; **$P_{\text{порог.}} = 1.0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$** при $\rho = 1$ (рис.2.5)

IV