

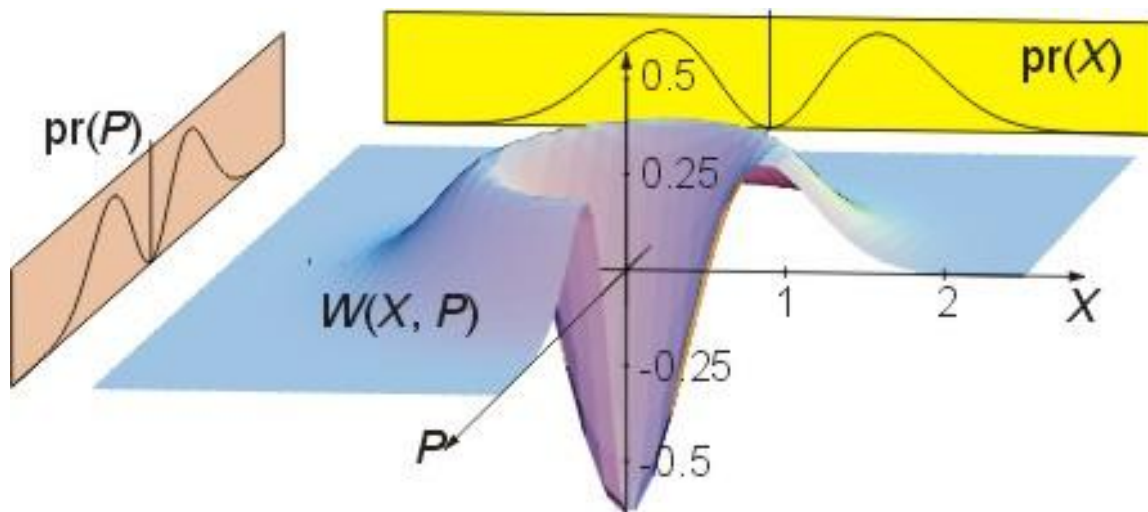
Московский физико-технический институт (государственный университет)
Российский квантовый центр, лаборатория “Квантовой оптики”

Гомодинный детектор для квантовооптических измерений

студент 326 группы:
Кужамуратов Арсен

Долгопрудный, 2017

Гомодинный детектор как средство регистрации “квантовых портретов”



Функция Вигнера для однофотонного состояния

Оптическая гомодинная томография

Требования к электронному усилителю и фотодиодам:

- полоса усиления и равномерность усиления

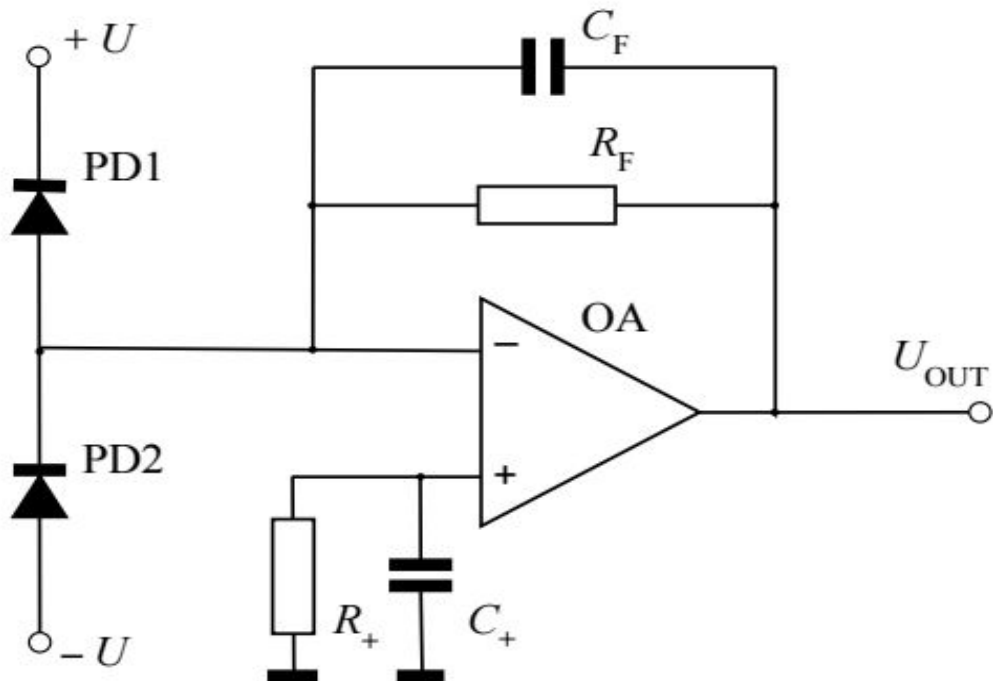
 - в пределах этой полосы (~ 100 МГц);

- низкий уровень электронного шума (< 10 пА/Гц^{1/2});

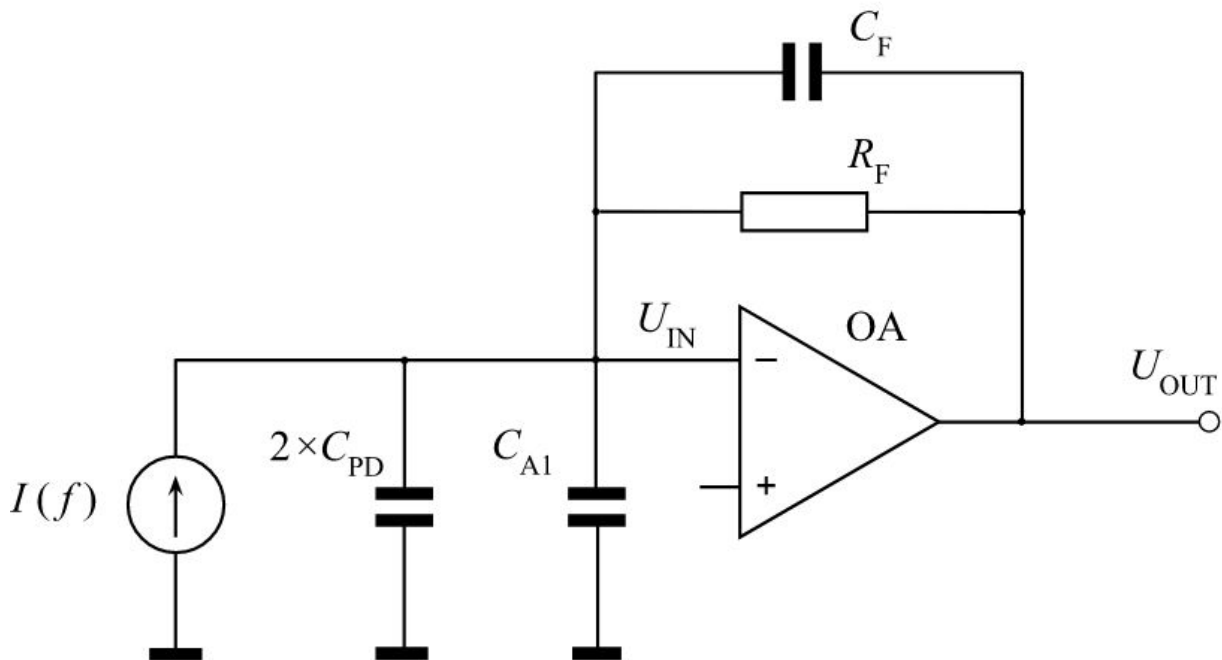
- соотношение сигнал-шум (> 10 дБ).

Схема операционного усилителя с обратной связью

Задача: поиск соответствия количественной модели усилителя его реальным характеристикам.



Полоса усиления ГД



Теоретический расчет для полосы усиления дает:

$$|G(f)|^2 = \frac{1}{1 + (p^2 - 2)\frac{f^2}{f^{*2}} + \left(\frac{f^2}{f^{*2}}\right)^2},$$

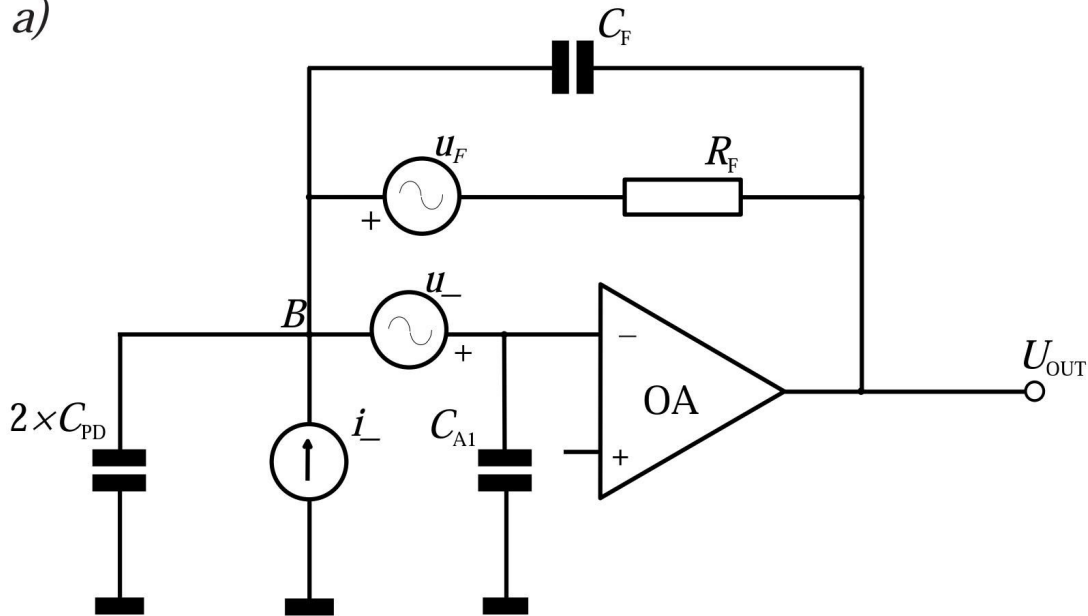
где введены параметры:

$$f^* = \sqrt{\frac{A_0 f_0}{2\pi R_F (2C_{PD} + C_F + C_{A1})}},$$

$$p = \left(2\pi R_F C_F + \frac{1}{A_0 f_0}\right) f^*.$$

Электронный шум

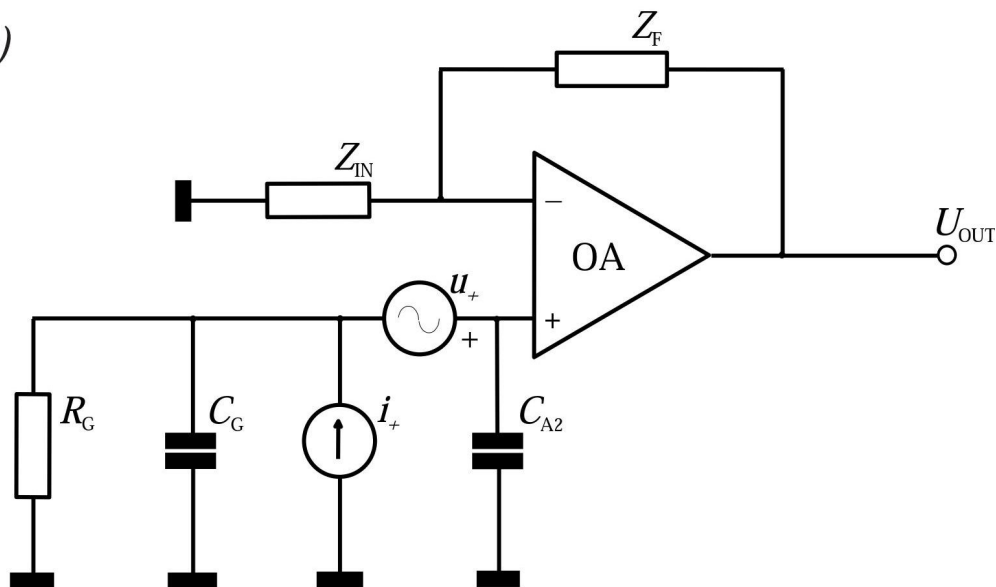
a)



$$U_{OUT} = -G(f) [1 + 2\pi j f R_F (2C_{PD} + C_F + C_{A1})] u_-,$$

$$U_{OUT} = -R_F G(f) i_-, U_{OUT} = -G(f) u_F.$$

b)



$$U_{\text{OUT}} = G(f) [1 + 2\pi j f R_F (2C_{\text{PD}} + C_F + C_{A1})] u_+,$$

$$U_{\text{OUT}} = R_G i_+ G(f) \frac{1 + 2\pi j f R_F (2C_{\text{PD}} + C_F + C_{A1})}{1 + 2\pi j f R_G (C_G + C_{A2})},$$

$$U_{\text{OUT}} \approx R_F \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R_G}} G(f) \frac{2C_{\text{PD}} + C_F + C_{A1}}{C_G}.$$

Суммарная формула электронного шума

$$\langle U_{\text{OUT}}^2 \rangle = |G(f)|^2 \left([1 + 4\pi^2 R_F^2 (2C_{\text{PD}} + C_F + C_{\text{A1}})^2 f^2] \langle u_{\text{A}}^2 \rangle + R_F^2 \langle i_-^2 \rangle + 4kTR_F \Delta f \right).$$

Для анализа экспериментальных данных представим нормированный эл.шум в виде:

$$\frac{\langle U_e^2(f) \rangle}{|G(f)|^2 R_F^2} = (A + Bf^2) \Delta f,$$

где

$$A = \frac{\langle u_{\text{A}}^2 \rangle}{R_F^2} + \langle i_-^2 \rangle + \frac{4kT}{R_F},$$

$$B = [2\pi(2C_{\text{PD}} + C_F + C_{\text{A1}})]^2 \langle u_{\text{A}}^2 \rangle = \left(\frac{A_0 f_0}{R_F f^{*2}} \right)^2 \langle u_{\text{A}}^2 \rangle.$$

Соотношение сигнал-шум

$$\langle I^2 \rangle / \Delta f = 2eI_0, \text{ где } I_0 = \frac{\eta e}{\hbar\omega} P.$$

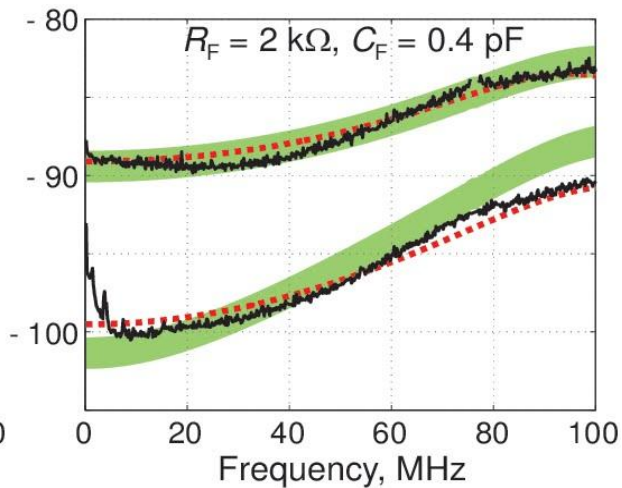
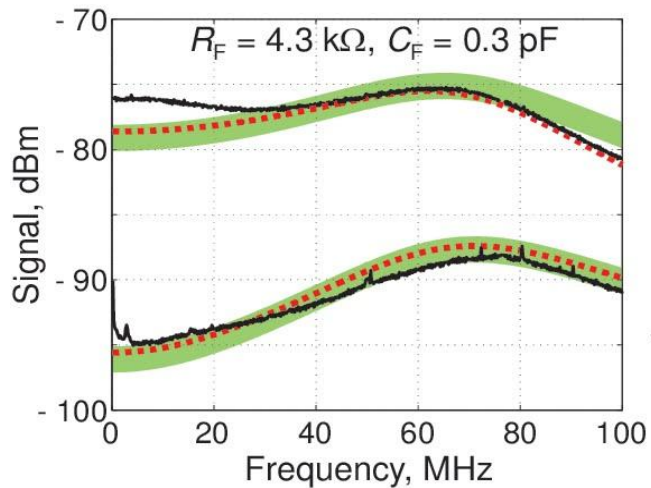
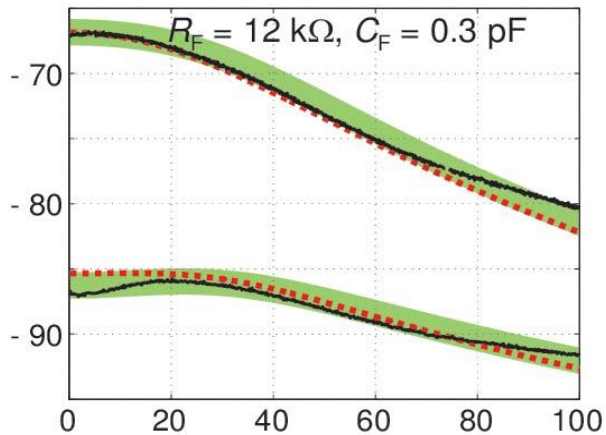
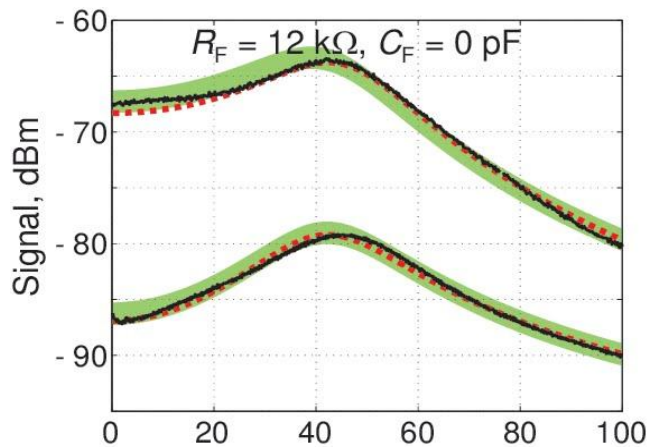
$$\langle U_e^2(f) \rangle = R_F^2 |G(f)|^2 \langle I^2 \rangle = \frac{2\eta e^2 P}{\hbar\omega} \Delta f \frac{R_F^2}{\left(1 - \frac{f^2}{f_*^2}\right)^2 + p^2 \left(\frac{f}{f_*}\right)^2},$$

Отношение светового шума к электронному шуму:

$$\frac{\langle U_{\text{OUT}}^2 \rangle}{\langle U_e^2 \rangle} = 2 \frac{\eta e^2 P_{\text{max}}}{\hbar\omega} \frac{1}{(A + Bf^2)} + 1.$$

Для постоянной составляющей имеем:

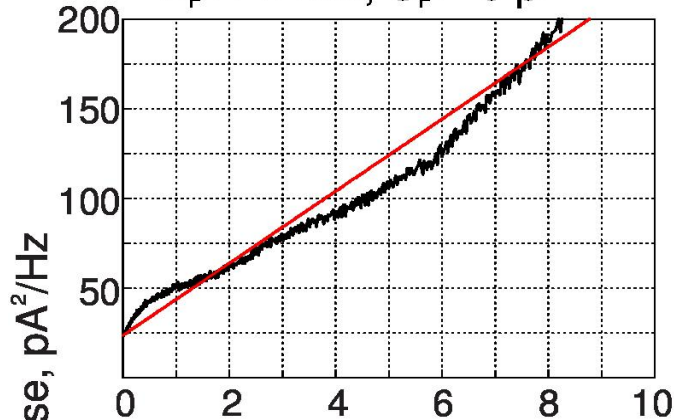
$$\frac{\langle U_{\text{OUT}}^2 \rangle}{\langle U_e^2 \rangle} \approx 2 \frac{\eta e^2 P_{\text{max}}}{\hbar\omega} \frac{1}{\langle i_-^2 \rangle} + 1 = \frac{2eI_0}{\langle i_-^2 \rangle} + 1.$$



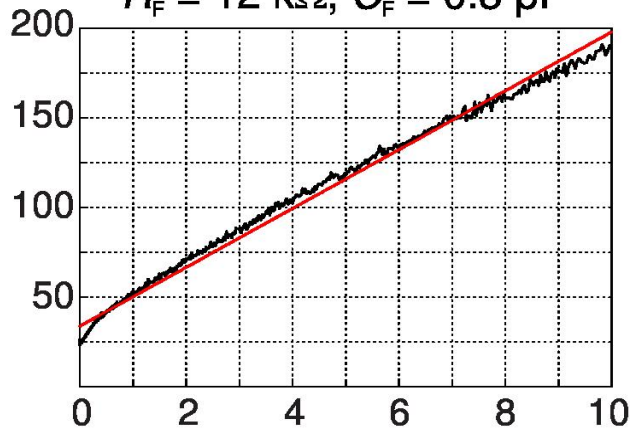
Расчетные параметры полосы усиления и суммарная емкость на входе

	f^* , MHz	p	$2C_{PD} + C_F + C_{A1}$, pF
$R_F = 12 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0 \text{ pF}$	47.3 ± 3	0.63 ± 0.05	23.1 ± 2
$R_F = 12 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0.3 \text{ pF}$	44.5 ± 3	1.9 ± 0.1	26.1 ± 2
$R_F = 4.3 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0.3 \text{ pF}$	73.3 ± 4	0.75 ± 0.05	26.8 ± 2
$R_F = 2 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0.4 \text{ pF}$	103 ± 5	0.54 ± 0.05	29.4 ± 3

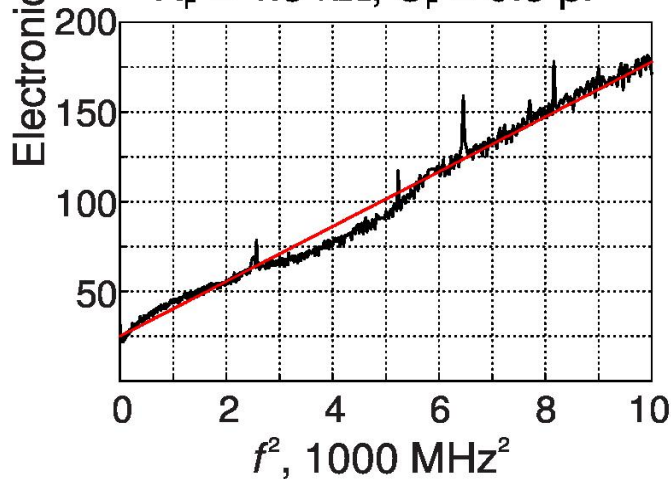
$R_F = 12 \text{ k}\Omega$, $C_F = 0 \text{ pF}$



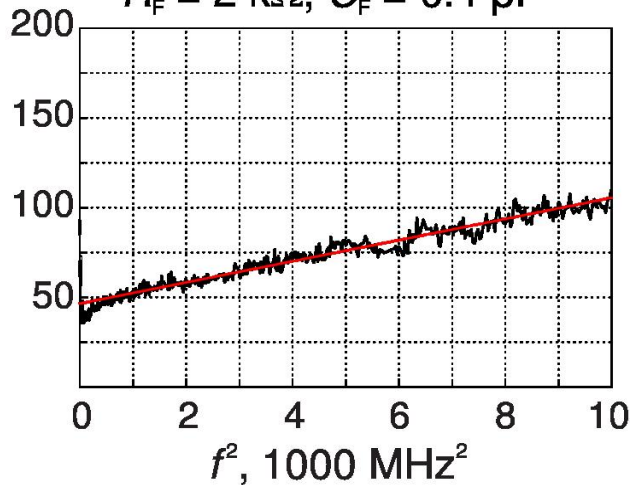
$R_F = 12 \text{ k}\Omega$, $C_F = 0.3 \text{ pF}$



$R_F = 4.3 \text{ k}\Omega$, $C_F = 0.3 \text{ pF}$



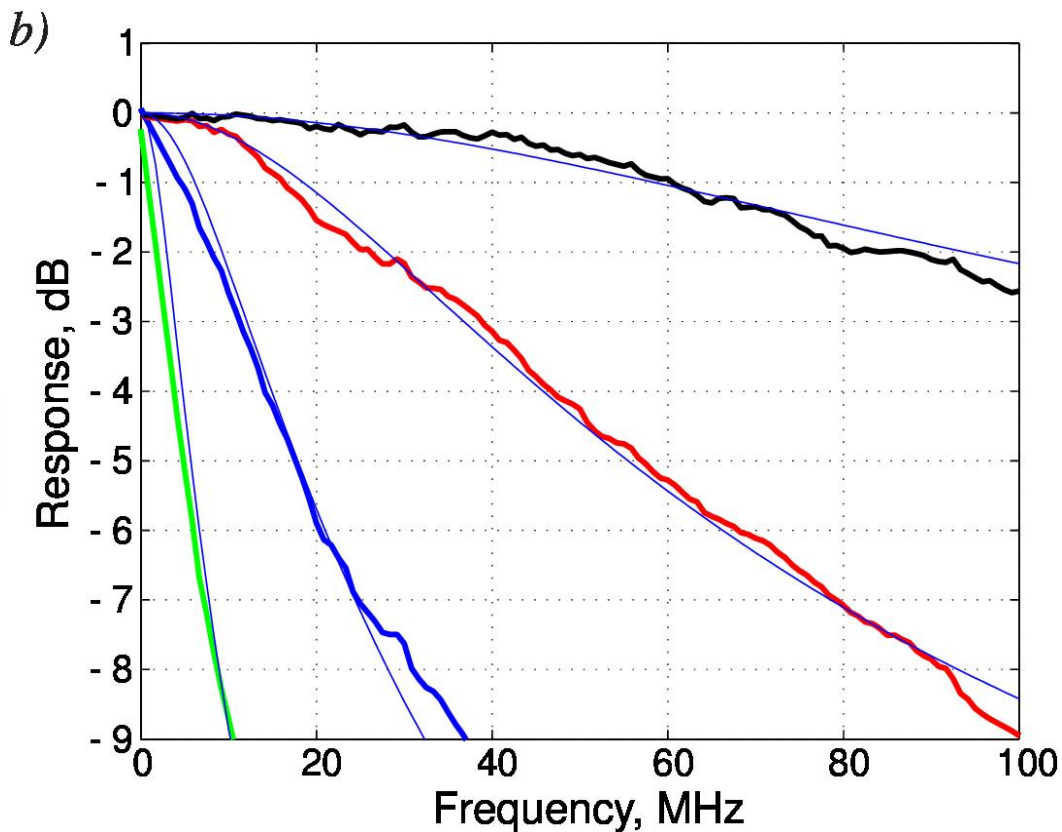
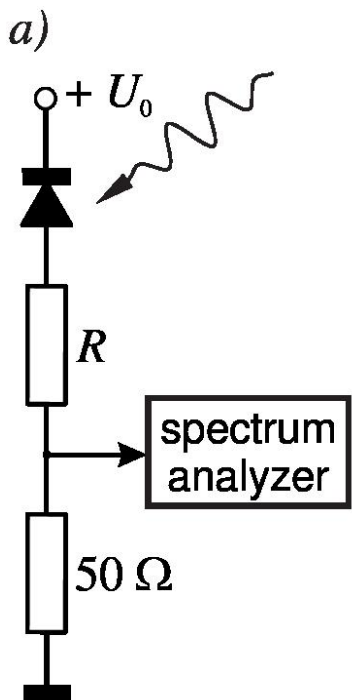
$R_F = 2 \text{ k}\Omega$, $C_F = 0.4 \text{ pF}$



Расчетные параметры электронного шума

	$\sqrt{\langle u_A^2 \rangle}, \text{nV/Hz}^{1/2}$	$\sqrt{\langle i_-^2 \rangle}, \text{pA/Hz}^{1/2}$
$R_F = 12 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0 \text{ pF}$	0.97 ± 0.2	4.7 ± 0.5
$R_F = 12 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0,3 \text{ pF}$	0.78 ± 0.2	5.6 ± 0.5
$R_F = 4.3 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0.3 \text{ pF}$	0.73 ± 0.2	4.6 ± 0.5
$R_F = 2 \text{ k}\Omega$ $C_F = 0.4 \text{ pF}$	0.42 ± 0.2	6.2 ± 0.5
Unified set	0.85	5.1

Расчет емкости фотодиода S5972



Выводы

1. Достигнуто количественное согласие с теоретической моделью.
2. Данные по суммарной емкости, емкости фотодиодов и емкости усилителя значительно превышают расчет по паспортным данным.
3. Параметры шумов: по напряжению совпадают с паспортными значениями и по току больше паспортного значения в ~ 1.5 раза.
4. Сформулированы оптимальные величины элементов схемы; построена и испытана плата гомодинного детектора.