

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

К. А. ГУЛГАЛАРЯН, Ю. Н. БАРОЯН

ПРИЕМНИК СВЕТА С ВЫСОКОДОБРОТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Известно, что самым чувствительным приемником света является фотоумножитель (ФЭУ). Для приема модулированного света, частоты модуляции которого находятся вне полосы пропускания ФЭУ (выше нескольких десятков МГц), фототок модулируется колебаниями местного генератора. При этом в спектре фототока появляется составляющая с частотой, равной разности между частотами модуляции света и местного генератора. Частота последней выбирается так, чтобы сигнал разностной частоты находился в полосе пропускания умножительной системы ФЭУ и усиливался.

Для эффективной модуляции фототока, ФЭУ помещается в специальный резонатор, после которого, пройдя через полупрозрачный фотокатод, модулирует фототок (рис. 1) [1]

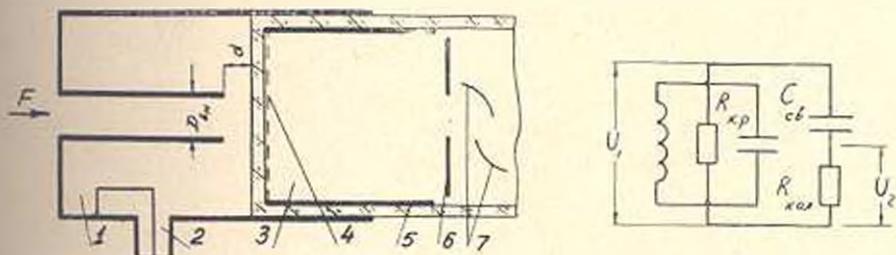


Рис. 1. ФЭУ с резонатором и его эквивалентная схема. 1—резонатор; 2—линия для ввода энергии в резонатор; 3—ФЭУ; 4—полупрозрачный фотокатод; 5—катодный цилиндр (мантия); 6—диафрагма; 7—умножительная система; F—световой поток

Однако, при введении ФЭУ в резонатор добротность последнего значительно уменьшается из-за активного сопротивления полупрозрачного фотокатода. Сохранение высокой добротности резонатора является важной задачей. В данной статье рассматриваются методы повышения добротности резонатора с ФЭУ и некоторые практические применения таких устройств.

**Основной фактор, уменьшающий добротность.** Основным фактором, уменьшающим добротность резонатора, является сопротивление фотокатода. На рис. 2 сопротивление между *a* и *b* является нагрузкой генератора, при сочетании ФЭУ с резонатором оно является нагрузкой резонатора, что уменьшает добротность последнего. Согласно [2] при  $C_{12} = 0$  проводимость между *a* и *b* определяется выражением

$$Y_{ab} = \pi D_{111} \sqrt{\frac{\omega C_{11}}{2R}} (1 + j).$$

откуда

$$Z_{ab} = \frac{1}{Y_{ab}} = \frac{1}{\pi D_{\text{вн}}} \sqrt{\frac{R}{2\omega C_{01}}} (1 - j), \quad (1)$$

где  $C_{01}$  — емкость между электродами 1 и 2, приходящая на единичную площадь;  $R$  — сопротивление между противоположными сторонами квадратного элемента фотокатода;  $Z_{ab}$  — сопротивления между  $a$  и  $b$ .

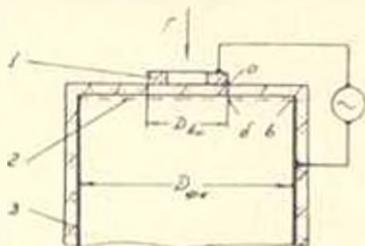


Рис. 2 ФЭУ с внешним электродом: 1 — внешний кольцевой электрод; 2 — полупрозрачный фотокатод; 3 — катодный цилиндр;  $F$  — световой поток

Сопротивление между  $b$  и  $a$  это — сопротивление кольцеобразного участка фотокатода с внешним диаметром кольца  $D_{\text{вн}}$  и внутренним  $D_{\text{вн}}$ , определяемое из соотношения [1]

$$R_{\text{кв.к.}} = \frac{R_{\text{л}}}{2\pi} \ln \frac{D_{\text{вн}}}{D_{\text{вн}}}. \quad (2)$$

Сопротивления  $R_{\text{кв.к.}}$  и  $Z_{ab}$  включены последовательно, поэтому полное

выходное сопротивление будет:

$$Z_{\text{вн}} = \frac{1}{\pi D_{\text{вн}}} \sqrt{\frac{R}{2\omega C_{01}}} + \frac{R}{2\pi} \ln \frac{D_{\text{вн}}}{D_{\text{вн}}} + \frac{1}{\pi D_{\text{вн}}} \sqrt{\frac{R}{2\omega C_{01}}}. \quad (3)$$

Величины  $C_{01}$  и  $R$  экспериментально определены следующим образом. Измеряя  $Z_{\text{вн}}$  при разных частотах, составляя и решая систему уравнений, аналогичную (3), определяли  $C_{01}$  и  $R$ . Для ФЭУ-51 среднее значение  $C_{01}$  составляло  $5 \text{ пф см}^2$ , а  $R = 80 \text{ ком}$ . Из (3) с учетом средних значений  $C_{01}$  и  $R$  следует, что на частотах более нескольких десятков  $\text{МГц}$   $Z_{\text{вн}}$  активное и равно  $R_{\text{кв.к.}}$ . Из этого можно сделать практический вывод: при сочетании ФЭУ с резонатором, последний нагружается активным сопротивлением  $R_{\text{кв.к.}}$ . Для наглядности приведем пример, показывающий порядок  $R_{\text{кв.к.}}$ . Фотомножитель ФЭУ-51 с диаметром фотокатода  $D_{\text{к}} = 25 \text{ мм}$ , диаметром внешнего электрода  $D_{\text{вн}} = 12,5 \text{ мм}$ ,  $C_{01} = 5 \text{ пф см}^2$  и  $R = 80 \text{ ком}$  имеет  $R_{\text{кв.к.}} = 8,8 \text{ ком}$ . Если резонансное сопротивление резонатора значительно больше  $R_{\text{кв.к.}}$ , то при введении ФЭУ в резонатор (рис. 1) нагруженное сопротивление резонатора будет примерно равно  $R_{\text{кв.к.}}$ , что означает значительное уменьшение добротности резонатора. Тогда, при мощности генератора, питающего резонатор, равной  $1 \text{ вт}$ , напряжение в резонаторе  $U_{\text{р.кв.к.}} = \sqrt{PR_{\text{кв.к.}}} = \sqrt{1 \cdot 8,8 \cdot 10^3} = 94 \text{ в}$ , что соответствует экспериментальным измерениям. Этим напряжением и модулируется фототок.

**Повышение нагруженной добротности резонатора с ФЭУ.** Для повышения нагруженной добротности резонатора с ФЭУ необходимо уменьшить связь между ними. Уменьшение связи с резонатором в

устройстве, изображенном на рис. 1, осуществляется увеличением расстояния между внутренним стержнем резонатора и фотокатодом. Эквивалентная схема устройства представлена на рис. 1. Резонансное сопротивление  $R_{np}$  через емкость связи  $C_{св}$  соединено с входным сопротивлением фотокатода  $R_{фот}$ . Изменением расстояния  $d$  меняется  $C_{св}$  и тем самым коэффициент трансформации  $K = U_2/U_1$ , где  $U_2$  — падение напряжения на фотокатод, т. е. напряжение, которое модулирует фототок,  $U_1$  — максимальное напряжение в резонаторе. На рис. 3 ФЭУ находится в металлической трубке 6, а внешний электрод 5 с

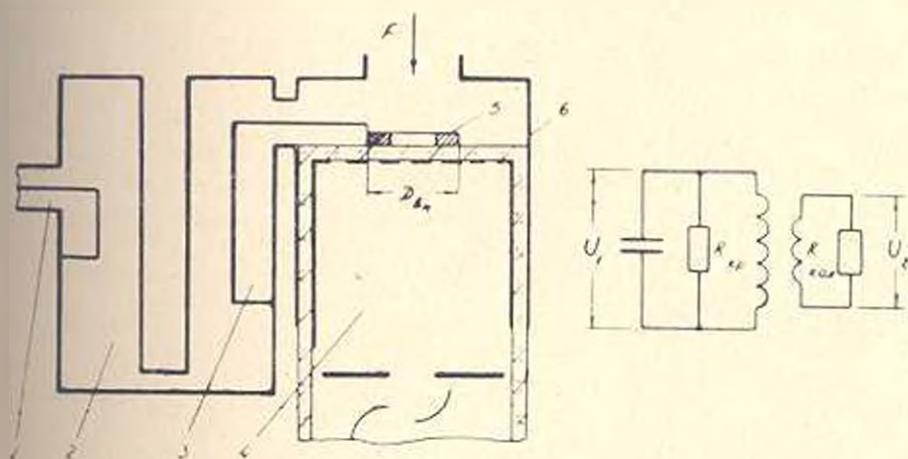


Рис. 3 ФЭУ с резонатором, когда ФЭУ находится вне резонатора, и его эквивалентная схема. 1 — линза для ввода энергии, 2 — резонатор, 3 — петля связи, 4 — ФЭУ, 5 — внешний электрод, 6 — металлическая трубка; Г — оптический поток

резонатором 2 соединен петлей связи 3. Величина связи регулируется поворотом плоскости петель связи относительно магнитного поля резонатора. При этом меняется коэффициент трансформации. Отметим, что здесь возможны и другие виды связи: емкостная и кондуктивная.

Для устройств, приведенных на рис. 1 и рис. 3, напряжения  $U_1$  и  $U_2$  можно определить следующим образом. Сопротивление  $R_{фот}$  приведенное в цепь с напряжением  $U_1$  ( $R_{np} = \frac{R_{фот}}{K^2}$ ) параллельно включается с резонансным сопротивлением резонатора  $R_{кр}$ . Тогда эквивалентное сопротивление будет:

$$R_{э} = \frac{R_{кр} \frac{R_{фот}}{K^2}}{R_{кр} + \frac{R_{фот}}{K^2}} \quad (4)$$

Чем больше  $R_{фот}$ , тем больше нагруженная добротность резонатора. Напряжение в резонаторе

$$U_1 = \sqrt{PR_2} = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{PR_{\text{вх}} R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}} - R_{\text{хол}} K^2}} \quad (5)$$

уменьшается с увеличением  $K$  (где  $P$  — мощность, которая вводится в резонатор).

Моделирующее напряжение

$$U_2 = K U_1 = \sqrt{\frac{PR_{\text{вх}} R_{\text{вых}}}{R_{\text{кр}} + \frac{R_{\text{хол}}}{K^2}}} \quad (6)$$

увеличивается с увеличением  $K$ . Графики зависимости  $U_1$  и  $U_2$  от  $K$  (при  $R_{\text{фк}} = 10 \text{ ком}$ ;  $R_{\text{кр}} = 400 \text{ ком}$ ;  $P = 1 \text{ вт}$ ), построенные по (5) и

(6), показаны на рис. 4. Там же показана зависимость  $U_1 U_2$  от  $K$ . Эта функция имеет максимум при оптимальном коэффициенте трансформации

$$K_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{кр}}}} \quad (7)$$

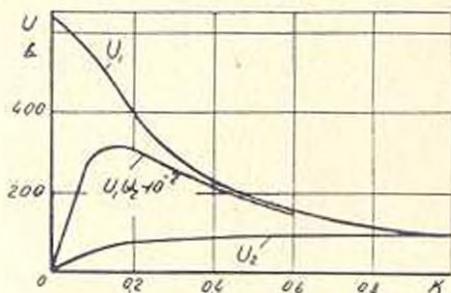


Рис. 4. График зависимости модулирующих напряжений от коэффициента трансформации

В обоих устройствах (рис. 1 и рис. 3) можно получить необходимые добротности и  $U_1 U_2$ .

Выбор той или иной конструкции зависит от конкретных конструктивных условий. Во многих практических задачах предпочтение следует отдать конструкции по рис. 3. Основные преимущества этой конструкции следующие: малые габариты; возможность использования резонаторов любых типов, и том числе полосковых и резонаторов, выпускаемых промышленностью; простота настройки и перестройки резонатора.

**Перестраиваемый приемник света.** Идея расположения ФЭУ в металлической трубке вне резонатора (рис. 3) позволила создать многогабаритный приемник света простой конструкции, который перестраивается в весьма широком диапазоне частот. Здесь можно использовать все известные перестраиваемые резонаторы. Для примера на рис. 5 показана схема устройства, позволяющего осуществить прием света, модулированного в диапазоне от 150 МГц до 1000 МГц. Мощность местного генератора  $\sim 1 \text{ вт}$ . Напряжение с резонатора 1 посредством штыря связи 5 подается на внешний электрод 7 фотоумножителя 9. Широкий диапазон механической перестройки резонатора при его небольших габаритах обусловлен формой подвижного электрода 3, перемещение которого меняет емкость квазистационарного резонатора в широком диапазоне.

**Оптический фазовый дальномер.** Известно, что дальномеры, работающие по фазовому принципу, обеспечивают наибольшую точность измерения расстояния. Принцип действия оптических фазовых дальномеров заключается в измерении разности фаз между излучаемым и отраженным от цели модулированными потоками. Ошибка изме-

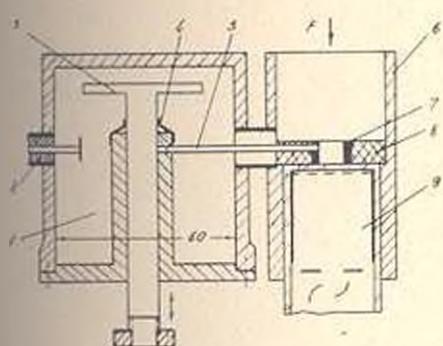


Рис 5. Широкополосный приемник света для частоты модуляции света от 150 до 1000 Мгц. 1—резонатор; 2—линза для ввода энергии в резонатор; 3—подвижный электрод; 4—контакты; 5—штырь связи; 6—металлическая трубка; 7—внешний кольцевой электрод; 8—диэлектрик; 9—ФЭУ; F—оптический поток

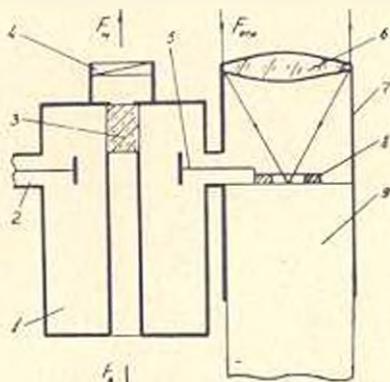


Рис 6. Оптический фазовый дальномер. 1—резонатор; 2—линза для ввода энергии; 3—модулирующий кристалл; 4—анализатор; 5—элемент связи; 6—линза; 7—металлическая трубка; 8—внешний электрод; 9—ФЭУ;  $F_0$ —немодулированный свет от лазера;  $F_m$ —модулированный свет;  $F_{отр}$ —отраженный от цели свет

рения расстояния  $\Delta D$ , обусловленная ошибкой измерения разности фаз  $\Delta\varphi$ , определяется [3] как

$$\Delta D = \frac{c}{f} \cdot \frac{\Delta\varphi}{4\pi}$$

где  $c$ —скорость света;  $f$ —частота модуляции света. Чем выше частота модуляции, тем меньше ошибка измерения расстояния. Например, при  $f=1000$  Мгц и  $\Delta\varphi=1$  дальность можно определить с ошибкой 0,4 м. Отсутствие сверхвысокочастотных ФЭУ ограничивает создание точных дальномеров простой конструкции. Вышерассмотренные устройства позволяют решить эту задачу.

На рис. 6 показана схема дальмера, принцип действия которого заключается в следующем. Свет  $F_0$  от лазера модулируется полем резонатора 1 при помощи кристалла 3 и анализатора 4. Модулированный по амплитуде свет  $F_m$  направляется на цель, отражаясь от цели, собирается линзой 6 и направляется на фотокатод фотоумножителя 9.

На фотокатод падает амплитудно-модулированный свет

$$F_{отр} = F_0 + F_m \cos \omega t, \quad (8)$$

где  $F_0$ —постоянная составляющая света;  $F_m$ —амплитуда переменной составляющей.  $F_{отр}$  вызывает от катода модулированный фототок

$$i = I_0 - I_m \cos \omega t. \quad (9)$$

Далее фототок  $i$  модулируется полем резонатора с внешним электродом 8. Для простоты предположим, что фототок модулируется по синусоидальному закону с коэффициентом модуляции

$$K_m = 1 + m \cos(\omega t + \varphi), \quad (10)$$

где  $m$ —глубина модуляции фототока;  $\varphi$ —угол, учитывающий изменение фазы поля резонатора за время прохождения света до цели и обратно.

При модуляции фототока выражение (9) примет вид:

$$i_1 = iK_m = I_0 + I_m \cos \omega t + mI_0 \cos(\omega t + \varphi) + \\ + \frac{I_m m}{2} \cos \varphi + \frac{I_m m}{2} \cos(2\omega t + \varphi). \quad (11)$$

На выходе ФЭУ выделяется постоянная составляющая

$$U_{\text{вых}} = \left( I_0 + \frac{I_m m}{2} \cos \varphi \right) M R_{\text{а}}, \quad (12)$$

где  $R_{\text{а}}$ —анодное сопротивление;  $M$ —коэффициент усиления ФЭУ.

При перемещении устройства и направлении цели (изменение  $\varphi$ )  $U_{\text{вых}}$  периодически уменьшается до минимального значения. Поэтому, зная какое-либо начало отсчета, можно по величине перемещения устройства определить дальность. Неоднозначность измерения исключается известными способами. Для повышения точности измерения устройство может быть снабжено различными фазокоммутирующими устройствами.

Питание внешнего электрода напряжением, полученным из резонатора, обусловлено тем, что при изменении температуры или других факторов, приводящих к расстройке резонатора, фазы напряжения внешнего электрода и модулированного света меняются на одинаковую величину и не вносят ошибку в измерения. Нахождение ФЭУ вне резонатора и уменьшение связи, как уже отмечалось, позволит получить весьма большие значения добротности и тем самым большие напряжения на кристалле, что, в свою очередь, увеличивает глубину модуляции света и  $I_m$ . Но, при уменьшении связи уменьшается напряжение на внешнем электроде, что приводит к уменьшению глубины модуляции фототока  $m$ .

Существует оптимальная величина связи, при которой как на внешнем электроде, так и на кристалле получаются напряжения, достаточные для глубокой модуляции света и фототока. Из (12) следует, что полезная составляющая выходного сигнала достигает максимума при максимуме произведения  $I_m m$ . При принятом допущении (10) максимум  $I_m m$  имеет место при максимальном значении  $U_1 U_2$  (рис. 4). Таким

образом, в данном устройстве необходимо выполнить условие оптимального коэффициента связи (7).

Ереванский политехнический институт им. К. Маркса

Поступило 9. IV. 1971.

Գ. Ա. ԳՈՒԴԱԶԱՐՅԱՆ, ՅՈՒ, Ն. ՔԱՐԱՅԱՆ:

ՈՐՅՈՒՆ ԲՆԱԿՆԵԼՆԵՅ ԲՈՒՐՁԻ ԼԱՎՈՐԱԿՈՒԹՅԱՆ  
ՈՆԶՈՆԱՏՈՐՈՎ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Դրամիտ են մեթոդներ, որոնք հնարավորություն են ընձևում բարձրաչափի ֆոտոռազմապատկիչ-սեղոնատարով սարքի բնակավորված լավորակությունը նասարված է սրտանմի համարժեք դիմադրության ինժեներական հաշվարկի հերված է լույսային ընդունիչում և մեծ ճշտության լուսաճեռաչափում նշված սարքի կիրառման սրինակներ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Գուգազարյան Կ. Ա. Высокочастотная модуляция фототока ФЭУ, «Приборы и техника эксперимента», № 5, 1970.
2. Գուգազարյան Կ. Ա. Новый способ управления электронным потоком в фотоэлектронных приборах, «Радиотехника», № 10, 1970.
3. Астафьев Г. П. и др. Радиотехнические средства наивысших летательных аппаратов. М., 1962.