

УДК 621.385.832.564.4

НОВАЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ПЕРЕДАЮЩАЯ ТРУБКА С ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЭФФЕКТ МОДУЛЯЦИИ ТОКА ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА, РЕМЕТ (Pyroelectric Modulation Effect Tube)

Н. А. Березкин, А. З. Дун, С. Ю. Меркин

Центральный научно-исследовательский институт "Электрон", Санкт-Петербург, Россия

Создана новая передающая трубка с пироэлектрической мозаичной мишенью на основе триглицинсульфата с чувствительностью в режиме панорамирования более 50 мкА/Вт, предельным разрешением 400 ТВ-лин/растр (22 ТВ-лин/мм), при глубине модуляции на отметке 200 ТВ-лин/растр более 60 %, с диапазоном рабочих температур мишени от -10 до +50 °С.

История возникновения и развития электронно-лучевых трубок с пироэлектрической мишенью со считыванием сигнала видиконным способом (пировидиконов) изложена в работах [1, 2]. Пировидиконы достигли к 1980 г. высокого совершенства, и перспективы улучшения их параметров связывались с улучшением характеристик материалов [3], уменьшением расплывания теплового рельефа путем создания мозаичной структуры [4, 5], увеличением эффективности считывания за счет использования бескроссоверного прожектора [6], снижением шумов тока пьедестала и теплоемкости мишени [7]. К настоящему времени эти возможности в основном исчерпаны и существенное улучшение параметров пировидиконов, по-видимому, невозможно. Перечисленные пути совершенствования оставались в рамках видиконного способа считывания, который состоит в регистрации тока смещения, возникающего при зарядке поверхности мишени пучком медленных электронов до потенциала катода. Однако потенциальный рельеф, возникающий на поверхности пироэлектрической мишени при изменении ее температуры вследствие поглощения теплового излучения, может быть считан путем модуляции полем зарядов элементов мишени потока электронов, собираемых на коллекторный электрод. Этот способ был реализован в запоминающих трубках [8], для пировидиконов он не применялся.

Проведенные авторами экспериментальные работы показали, что использование такого принципа формирования сигнала позволяет создать новую высокочувствительную трубку с пироэлектрической мишенью. Этот прибор авторы назвали РЕМЕТ (Pyroelectric Modulation Effect Tube). В настоящее время экспериментальные образцы РЕМЕТ имеют чувствительность в режиме панорамирования более 50 мкА/Вт, разрешение 400 ТВ-лин/растр, причем чувствительность слабо зависит от температуры мишени в диапазоне температур от -10 до +50 °С, что позволяет ослабить требования к стабилизации температуры мишени.

Конструкция мишени и трубки. Принцип работы

Колба и электронно-оптическая система экспериментальных образцов РЕМЕТ аналогичны соответствующим элементам пировидикона ЛИ 505. Мишень трубки показана на рис. 1.

В качестве пироэлектрического материала мишени используется сегнетоэлектрик ДТГС. Перед началом работы мишень поляризуется, причем в отличие от пировидиконов поляризация производится так, чтобы положительный полюс поляризационных диполей был направлен в сторону сканируемой поверхности.

Цикл работы трубки можно представить в виде последовательных процессов подготовки, экспонирования и считывания сигнала.

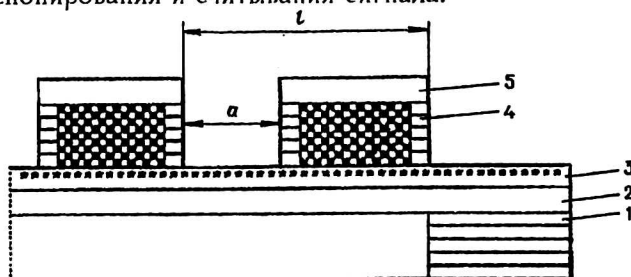


Рис. 1. Конструкция мишени экспериментальных образцов РЕМЕТ:

- 1 — металлическое кольцо; 2 — тонкая полимерная пленка; 3 — прозрачный электрод-комплект; 4 — мозаика пьезоэлектрических элементов толщиной 20 мкм, шагом l — 33 мкм, a = 8 мкм; 5 — слой алюминия толщиной 0,2 мкм

В начале подготовки на коммутируемой поверхности мишени имеется некоторый потенциальный рельеф, и задача подготовки состоит в установлении на этой поверхности рабочего потенциала U_0 , который может иметь значение от 0 до -10 В (все потенциалы отсчитываются от потенциала катода при считывании сигнала).

Подготовка разбивается на две стадии, в первой из которых производится повышение потенциала мишени до величины, превышающей U_0 , во второй — установление потенциала U_0 . Если в мишени обеспечивается необходимая скорость стекания зарядов с элементов, то первая стадия может проходить автоматически за время экспонирования. При отсутствии стекания зарядов первая стадия подготовки должна осуществляться путем сканирования пучком быстрых электронов при коэффициенте вторичной эмиссии $\sigma > 1$, а установление потенциала U_0 — пучком медленных электронов. Потенциал коллектора поддерживается постоянным в диапазоне значений от 10 до 60 В. При экспонировании падающее на мишень излучение вызывает изменение температуры пьезоэлектрика и, соответственно, потенциала поверхности элемента (при отсутствии утечек) на величину:

$$\Delta U = -\delta P \Delta T / \epsilon, \quad (1)$$

где δ , ϵ — толщина пьезоэлектрика и его диэлектрическая проницаемость, соответственно;

P — пьезоэлектрический коэффициент;

ΔT — изменение температуры за время экспонирования.

При нагревании элемента потенциал поверхности уменьшается, при остывании — растёт. К моменту считывания потенциал поверхности элемента будет равен:

$$U_3 = U_0 + \Delta U + U_y, \quad (2)$$

где $U_y \approx [U_k + U_0 + \Delta U / 2] [1 - \exp(-\tau_k \tau_y)]$ — изменение потенциала вследствие утечек;

U_k — потенциал коллектора;

τ_k — время экспонирования;

$\tau_y = C_3 R_3$ — постоянная времени утечки;

C_3 , R_3 — емкость и сопротивление элемента, соответственно.

Величина U_0 выбирается так, чтобы выполнялось условие $U_3 \leq 0$.

При считывании на катоде устанавливается нулевой потенциал и мишень сканируется пучком медленных электронов. Так как потенциал коллектора положителен, часть электронов попадает на коллектор и при отрицательных значениях потенциала поверхности элементов мишени, причем электрическое поле элемента действует как модулятор потока электронов, попадающих на коллектор.

Зависимость величины этого потока от потенциала коллектора, потенциала поверхности, геометрии мишени исследовалась для запоминающих трубок [8]. Потенциал U_0 , устанавливаемый во время подготовки, выбирается таким образом, чтобы в диапазоне изменения U_3 , (от $U_{3 \text{ min}}$ до $U_{3 \text{ max}}$) обеспечивалась линейная зависимость тока от потенциала мишени, а величина среднего тока коллектора $i_{\text{ко}}$ была минимальной. На линейном участке характеристики ток сигнала (пренебрегая утечками) равен $i_c = S \Delta U$, где $S = di_{\text{к}}/dU_3$ — чувствительность считывания, зависящая от потенциала коллектора и геометрии мишени, $i_{\text{к}}$ — ток коллектора.

Подставив из (1) значение ΔU , получим:

$$i_c = -PS/\varepsilon. \tag{3}$$

Подготовка и считывание сигнала в РЕМЕТ существенно отличаются от процессов в пировидиконах, тогда как формирование теплового и потенциального рельефа мишени идентично для этих трубок.

Теоретический анализ

Положим, для простоты, что и при подготовке медленными электронами $U_{\text{к}} = V_1^s$, тогда уравнение зарядки мишени в медленном режиме будет иметь вид:

$$\int dV_3 / [1 - \sigma(V_3)] = -j_s \tau_3 A_3 / C_3, \tag{4}$$

где j_s — плотность тока пучка в медленном режиме;

V_3 — потенциал поверхности элемента: $[1 - \sigma(V_3)] = (1 - \sigma_0) / [1 + \exp(V_3/E)]$;

$1 - \sigma_0$ — значение функции $[1 - \sigma(V_3)]$ при положительном потенциале мишени;

$V_3 \gg E$;

C_3 — емкость элемента: E — параметр энергетического размытия электронов в медленном пучке;

A_3 — площадь элемента.

Потенциал V_2^s после подготовки определяется соотношением:

$$V_1^s - V_2^s + E [\exp(-V_2^s/E) - \exp(-V_1^s/E)] = j_s \tau A (1 - \sigma_0) / C_3. \tag{5}$$

В быстром режиме аналогичные соотношения имеют вид:

$$\int dV_3 / [\sigma(V_3) - 1] = J_q \tau_3 A_3 / C_3, \\ V_1^q - V_2^q = (E_q + V_2^q) [\exp(\gamma) - 1], \tag{6}$$

где $E_q = [\sigma(V_3) - 1] / [d\sigma / d(V_3 / V_q)]$; $\gamma = (J_q \tau_3 A_3 / C_3) [d\sigma / d(V_3 / V_q)]$;

J_q — плотность тока пучка в быстром режиме.

Для того чтобы потенциал поверхности был равномерным и не зависел от исходного, необходимо, чтобы ток луча был достаточен для обеспечения потенциала $V_2^s = E$; условие достаточности $J_s \gg C_s V_1^s / [\tau_s A_s (1 - \sigma_0)]$.

Анализируя выражения (2), (5), можно предположить два вида неравномерности потенциала рабочей точки РЕМЕТ: межэлементную неравномерность, связанную с неравномерностью утечек, и неравномерность с осевой симметрией, связанную с неравномерностью нормальной составляющей энергии электронов. Экспериментально наблюдаются оба вида неравномерности.

Для оценки достижимой величины чувствительности считывания S был проведен численный расчет зависимости тока коллектора от потенциала поверхности элемента при разных потенциалах коллектора и различных геометрических соотношениях между размером элемента и шагом структуры. Для простоты высота элемента полагалась малой по сравнению с его размером. На рис. 2 показаны три семейства характеристик с различной геометрией мишени (шаг структуры I был равен 33 мкм). Минимальная и максимальная величина чувствительности считывания S примерно 1,0 и 2,0 мА/В, соответственно. Ток сигнала обычного пировидикона (без учета инерционности считывания) равен:

$$i_c^{PEV} = P \Delta T / \tau_k,$$

отношение сигнала прибора РЕМЕТ к сигналу пировидикона равно

$$i_c^{РЕМЕТ} / i_c^{PEV} = -\tau_k S \delta / \varepsilon. \quad (7)$$

Подставляя значения $\delta = 20$ мкм, $\tau_k = 20$ мс, $\varepsilon = 20$, $S = 1,5$ мА/В, получим, что чувствительность прибора РЕМЕТ должна превышать чувствительность обычного пировидикона примерно в 10 раз. Несмотря на упрощения, сделанные в ходе расчетов, результаты этих оценок, как было показано в работе [9] достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

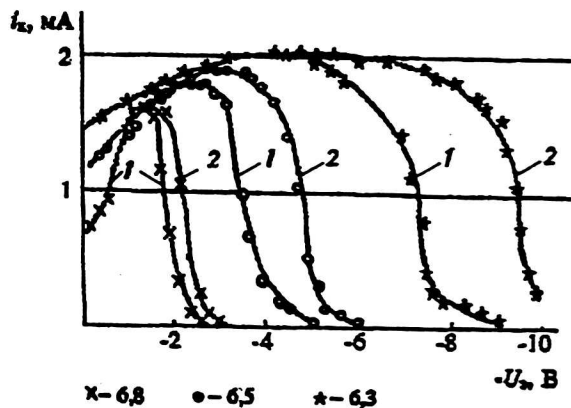


Рис. 2. Расчетные зависимости тока коллектора i_k от потенциала поверхности элемента U_s для различных напряжений U_k и геометрии мишени; 1 - $U_k = 2$ В; 2 - $U_k = 6$ В

Экспериментальные данные. Особенности использования приборов РЕМЕТ в тепловизионной камере

В настоящее время завершена первая стадия разработки трубок РЕМЕТ.

Исследования экспериментальных приборов РЕМЕТ показали, что приборы РЕМЕТ существенно превышают по чувствительности все ранее разработанные

пировидиконы. В таблице приведены сравнительные характеристики приборов РЕМЕТ и других типов пировидиконов.

Параметры РЕМЕТ, пировидиконов ЛИ-492, ЛИ-505, экспериментального прибора с мозаичной мишенью

Параметры	Серийные пировидиконы		Экспериментальные образцы		Примечание
	ЛИ-492	ЛИ-505	Прибор с мозаичной мишенью	РЕМЕТ	
Материал мишени	ДТГС	ТГС	ДТГС	ДТГС	
Толщина пироэлектроника, мкм	25	25	25	20—25	
Характеристика мишени	Сплошная		Мозаика шаг 33 мкм		
Чувствительность в режиме панорамирования, мкА/Вт	7	12	5	50—100	$V_d = 4$ мм/с, $d = 1$ мм
Чувствительность при облучении одиночным импульсом, мкА/Вт	5	7	4	30—50	$t_n = 20$ мс, $d = 1$ мм
Чувствительность в режиме обтюрации, мкА/Вт	1,5	1,5	1,3	7—10	$f_{изл} = 25$ Гц, $d = 1$ мм
Предельное разрешение, ТВ-лин/растр	300	300	400	400	
Модуляция на отметке, %:					В режиме модуляции потока излучения
200 лин/растр	30	30	50	50	
300 лин/растр	5	5	20	20	
Неравномерность тока пьедестала (тока рабочего потенциала), %	15	15	20	20	
Неравномерность сигнала, %	25	25	30	40	
Величина структурной помехи, нА	—	—	—	20—50	
Шумовой ток. (ср. квадр. значение), нА	1	1	1	1	Полоса частот 5 МГц
Температура мишени, °С	42±4	38±4	42±4	25—50	

Примечание. V_d — скорость движения изображения по мишени; t_n — длительность импульса излучения; d — размер изображения; $f_{изл}$ — частота модуляции потока излучения.

Для исследования экспериментальных приборов РЕМЕТ использовался специально разработанный макет тепловизионной камеры вместе с макетом устройства цифровой обработки сигнала. Цифровая обработка сигнала необходима для устранения влияния на изображение “структурной” помехи и неравномерности тока пьедестала прибора. Результаты испытаний камеры показали, что при работе РЕМЕТ в режиме стабилизации пьедестала за счет токов утечки минимально обнаруживаемая разность температур не превышает 0,05 °С.

Проведенные исследования показали, что приборы РЕМЕТ обладают, помимо повышенной чувствительности и разрешающей способности, значительно большей устойчивостью к вибропомехе (примерно в пять раз). Это связано как с конструкцией мишени, так и с конструкцией прибора. Режим со стабилизацией потенциала поверхности мишени приборов РЕМЕТ за счет утечек не является оптимальным вследствие повышенной инерционности сигнала. Инерционность прибора РЕМЕТ может быть уменьшена путем дополнительной положительной электрической зарядки поверхности пироэлектрических элементов мишени пучком “быстрых” электронов во время обратного хода строчной развертки, как это происходит в обычных пировидикопах. Лучшим, с точки зрения авторов, может быть режим предварительной подготовки мишени путем последовательного воздействия на поверхность мишени пучком “быстрых” и “медленных” электронов. Это может быть осуществлено при использовании 4-полевого режима.

На рис. 3 приведены временная диаграмма цикла изменения напряжения на катоде и модуляторе, а также падающего на мишень РЕМЕТ ИК-потока излучения от наблюдаемого объекта в 4-полевом режиме.

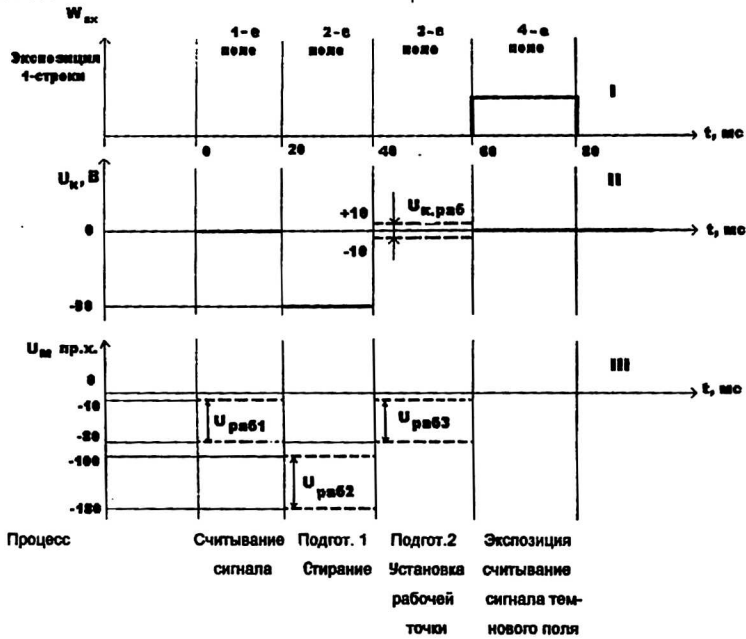


Рис. 3. Диаграмма цикла изменения облучения и напряжений на катоде и модуляторе в 4-полевом режиме работы РЕМЕТ

В первом поле сразу после перекрытия потока излучения происходит процесс считывания полезного сигнала.

Во втором поле происходит стирание отрицательного заряда на поверхности мишени РЕМЕТ пучком “быстрых” электронов путем подачи на катод прибора отрицательных импульсов напряжения с амплитудой 80 – 10 В, при этом на модулятор прожектора подается напряжение, создающее необходимый для стирания ток электронного луча. Второе поле представляет собой первую фазу подготовки мишени.

В следующей фазе подготовки (в третьем поле) происходит установка рабочего потенциала поверхности мишени в диапазоне от –10 до +10 В путем подачи соответствующего напряжения на катод.

В четвертом поле происходит считывание сигнала темного поля и экспонирование мишени излучением от объекта. В данном режиме работы прибора РЕМЕТ, во время обратного хода строчной развертки, электронный луч запирается подачей соответствующего напряжения на модулятор.

В 4-полевом режиме работы прибора развертка электронного луча должна обеспечивать построчное разложение таким образом, чтобы через время поля (20 мс) луч попадал точно в ту же точку мишени, что и в предшествующем поле. Это позволяет использовать сигнал, считываемый в четвертом поле, для запоминания его в устройстве цифровой обработки сигнала и последующего вычитания его из сигнала, образующего в первом поле. Таким образом удается практически полностью вычистить из сигнала паразитную структурную помеху и неравномерность тока пьедестала по полю изображения.

Устройство цифровой обработки сигнала должно вычитать из сигнала в первом поле “структурную” помеху до шумов предусилителя камеры, а также по-

вторять на выходе устройства обработанный сигнал в течение остальных полей цикла.

Четырехполевой режим позволяет снизить требования к стабильности питающих напряжений и разверток камеры благодаря цикличности воспроизведения темнового пьедестала и структурной помехи.

По своим основным характеристикам тепловизионная камера с РЕМЕТ не будет уступать камерам на основе микроболометрических и пироэлектрических матриц.

Выводы

Предложена и разработана высокочувствительная телевизионная передающая трубка нового типа с пироэлектрической мишенью, использующая эффект модуляции тока электронного луча, РЕМЕТ.

Чувствительность РЕМЕТ достигает величины 100 мкА/Вт — в режиме панорамирования, 30 мкА/Вт — в режиме однократной записи; 5—10 мкА/Вт — в режиме обтюрации, что примерно в 5—10 раз превышает соответствующее значение чувствительности обычных пировидиконов.

РЕМЕТ обладает высокой разрешающей способностью и повышенной устойчивостью к воздействию вибропомехи.

Минимально обнаруживаемая разность температур тепловизионной камеры на основе РЕМЕТ не выше 0,05 °С.

Тепловизионная камера с трубкой РЕМЕТ для снижения инерционности должна обеспечивать создание дополнительного тока пьедестала трубки путем зарядки мишени "быстрыми" электронами во время обратного хода строчной развертки электронно луча.

Оптимальным режимом работы РЕМЕТ в тепловизионной камере является 4-полевой режим.

Тепловизионная камера с РЕМЕТ обязательно должна содержать в себе устройство цифровой обработки сигнала. Это устройство должно обеспечивать вычитание из сигнала структурной помехи и неравномерности пьедестала до уровня шумов.

По своим основным характеристикам тепловизионная камера с РЕМЕТ не будет уступать камерам на основе микроболометрических и пироэлектрических матриц.

Литература

1. Cosa A. J. The pyroelectric vidicon — a review//SMIE. 1987. V. 807. № 1. P. 25—32.
2. Singer B. S. Theory and Performance Characteristics of Pyroelectric Imaging Tubes.//Pickup and Display, 1977. V. 3, B. Kazan, Ed. Academic Press. — New-York. P. 2—81.
3. Yao Xi, Fang C., Chen Z., Cross L. F. Dielectric and Pyroelectric Properties of Doped Triglycene Sulphate Crystals//Int. Conf. Prop. and Appl. Dielectric Mater. Xian, June, 24—29, 1985, Conf. Rec. V. 1.
4. Watton R. Pyroelectric Materials: Operation and Performance in Thermal Imaging Camera Tubes and Detector Arrays//Ferroelectrics. 1976. V. 10. № 1—4. P. 91—98.
5. Jamaka E., Teranishi A., Nakamura K., Nagashima T. Pyroelectric Vidicon with Grooved Retina of PbTiO₃ Ceramic//Ibid. P. 305—308.
6. Shumei He. High Performance Pyroelectric Vidicon//Chin. J. Infrared Res. 1986. V. 5B, June. P. 79—87.
7. Singer B. M., Staneck W. G., Stupp E. H., Kurczewski R. V. Suppression of Pedestal Noise in a Pyroelectric Vidicon//IEEE Transaction on Electron Devices. V. ED-27. № 1. P. 193—198.

8. Денбновский С. В., Лещинин А. В., Семенов Г. Ф. Преобразование информации на новых запоминающих ЭЛТ. — М.: Энергостандарт, 1989.

Авторы благодарят инженеров ЦНИИ "Электрон" (Санкт-Петербург), проделавших экспериментальную работу по разработке, изготовлению и исследованию образцов РЕМЕТ и макета камеры.

NEW HIGH SENSITIVE PICKUP TUBE WITH PYROELECTRIC TARGET, USING THE MODULATION EFFECT OF ELECTRON BEAM CURRENT, REMET (Pyroelectric modulation effect tube)

N. A. Beriozkin, A. Z. Doon, S. Y. Merkin
Electron Central Research Institute, St.-Peterburg, Russia

A new high sensitive television pickup tube with pyroelectric target, used electron beam current modulation effect by target element charge field, was designed (Pyroelectric modulation effect tube-REMET). Surface target charges, created by registered radiance induced temperature change, are modulate the flux of electrons deposited on target's collector from scanning electron beam. This method of the output signal forming has been used in new design of the pick-up tube with reticulated target, made of deuterated triglycine-sulphate. Sensitivity of more 50 $\mu\text{A/W}$, resolution of 400 TV-lines per raster (22 TV-lines/mm) with modulation more than 60 % at 200 TV-lines, target operating temperatures from -10 to +50 °C have been achieved.