

ОХЛАЖДАЕМЫЕ ФОТОРЕЗИСТОРЫ С ЗАЗОРАМИ НА ОСНОВЕ CdHgTe

Ф.Н. КАЗИЕВ, Ш.М. КУЛИЕВ, Р.И. МУХТАРОВА, Э.Ю. САЛАЕВ

*НИИ Фотоэлектроники АН Азербайджана
370141, Баку, ул. Ф. Агаева, 555-й квартал*

Проведен анализ работы охлаждаемого фоторезистора на основе CdHgTe с составной (типа меандра) чувствительной площадкой. Показано, что применение такой модификации фоторезистора позволяет повысить его чувствительность, уменьшить рабочий ток и понизить требования к шумовым характеристикам усилителя. Приведены фотоэлектрические параметры изготовленных на основе CdHgTe образцов охлаждаемых (до 77 К) фоторезисторов для диапазонов спектра 8+12 и 12+17 мкм.

Основной областью применения фоторезисторов на основе CdHgTe являются пассивные системы теплового изображения. Для таких систем используются фоторезистивные приемники с малоразмерными чувствительными площадками (до $0,1 \times 0,1$ мм² и менее). Вместе с тем, в последнее время получили развитие фоторезисторы на основе CdHgTe с увеличенными приемными площадками (более 1×1 мм²). Приборы с такими площадками необходимы в спектрометрической аппаратуре ИК-диапазона, оптико-электронных системах с применением CO₂-лазеров и других устройствах.

Настоящая работа посвящена исследованию охлаждаемых фоторезисторов увеличенной площади на основе CdHgTe. Особенностью рассматриваемых фоторезисторов является то, что выполнены они в виде блока из расположенных параллельно друг другу, с малым зазором, чувствительных площадок в форме удлиненного прямоугольника. Соединенные последовательно меандром, они образуют единую увеличенную чувствительную площадку.

Анализ работы фоторезистора и экспериментальные результаты

Предположим, что на фотоприемную площадку $A_d = \omega \cdot l$ (ω - ширина, а l - длина приемной площадки) падает поток монохроматического излучения W_λ . Рассматриваем случай низкого уровня оптического возбуждения. Положим, что скорость поверхностной рекомбинации мала, а толщина образца t меньше длины диффузии неосновных носителей заряда. Тогда генерацию неравновесных носителей заряда светом можно принять равномерной по объему образца. Охлаждаемые фоторезисторы обычно изготавливаются из монокристаллов CdHgTe n-типа проводимости с концентрацией электронов $n_o = (2 \div 5) \cdot 10^{14}$ см⁻³ при $T=77$ К. При работе фоторезистора в режиме, в котором сопротивление нагрузки равно сопротивлению фоторезистора R_1 , выражение для напряжения фотосигнала можно записать в виде [1]

$$U_s = \frac{1}{2} \frac{\eta \Phi_s V_1 \tau}{n_o t A_d}, \quad (1)$$

где η - квантовый выход, Φ_s - число фотонов сигнала, падающих за 1сек на фотоприемную площадку A_d , V_1 -напряжение смещения на фоторезисторе.

В выражении (1) принято, что время жизни электронов и дырок одинаковы ($\tau_n = \tau_p = \tau$).

В соответствии с (1) для вольтовой чувствительности фоторезистора S_{u1} можно записать

$$S_{u1} = \frac{U_s}{W_\lambda} = \frac{1}{2} \frac{\eta}{h\nu} \frac{V_1 \tau}{n_o t A_d}, \quad (2)$$

где $h\nu$ - энергия фотона падающего излучения.

В данной работе рассматриваются достаточно большие фотоприемные площадки, размеры которых значительно превосходят длину дрейфа неосновных носителей заряда, т.е. эффекты вытягивания (эксклюзии) электрическим полем избыточных неосновных носителей заряда отсутствуют. Тогда напряжение смещения V_1 ограничивается только выделяемой тепловой мощностью P в объеме образца

$$V_1 = (P R_1)^{1/2} = (P_o A_d R_1)^{1/2}, \quad (3)$$

где P_o - рассеиваемая мощность на единицу площади чувствительного слоя.

Предположим теперь, что фотоприемная площадка разделена параллельно линиям тока узкими зазорами на одинаковые элементы (длиной l). Соединенные последовательно меандром, эти элементы образуют единую чувствительную площадку (рис.1). Рассмотрим вопрос о том, как изменяются основные фотоэлектрические параметры фоторезистора (вольтовая чувствительность, обнаружительная способность) с изменением числа образующих его приемную площадку элементов. Примем следующие допущения:

1. Полный размер фотоприемной площадки A_d и ширина зазора между элементами d_i принимаются постоянными величинами. Переменными величинами принимаются число элементов z и ширина элемента. Так что увеличение числа элементов достигается за счет уменьшения ширины каждого элемента.

2. Рассматриваемая электрическая мощность на единицу площади чувствительного слоя P_o поддерживается постоянной.

3. Все элементы идентичны. Ширина каждого элемента значительно больше его толщины. Краевыми эффектами пренебрегаем.

$$S_{uz} = z S_{u1} \quad . \quad (8)$$

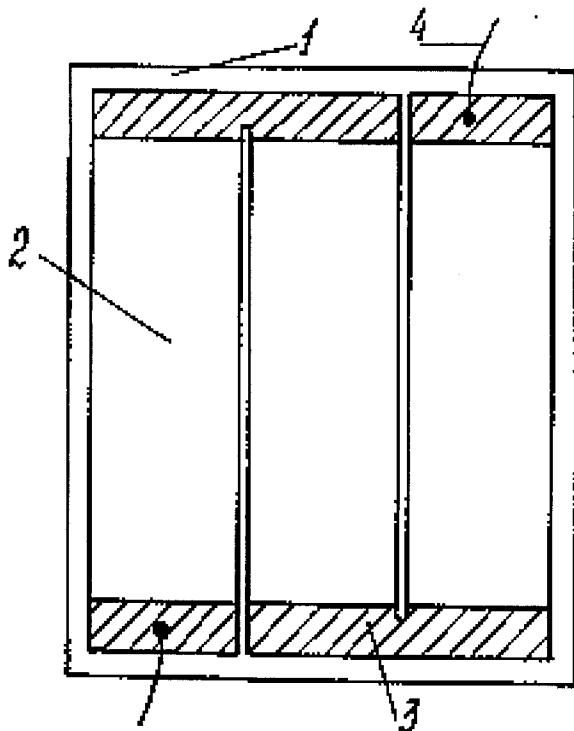


Рис.1. Конструкция фотодиода. 1 - подложка; 2 - фотоактивная площадка с зазорами; 3 - металлическое покрытие; 4 - электрические выводы.

Сопротивление составного фотодиода, состоящего из z элементов R_z и сопротивление единичного ($z=1$) фотодиода R_1 той же площади связаны соотношением

$$R_z = z^2 R_1 (1 - \beta)^{-1} \quad , \quad (4)$$

где β - отношение суммарной ширины межэлементных зазоров к полной ширине фотодиода, $\beta(z-1)d_i/\omega$. Определим сперва напряжение смещения V_z , приложенное к составному фотодиоду. В соответствии с (3) запишем

$$V_z = (P_o A_f R_z)^{1/2} \quad , \quad (5)$$

где A_f - активная площадь фотодетектора, $A_f = (1 - \beta) A_d$. Подставляя в (5) значение R_z из (4) и комбинируя с выражением (3), получим условие постоянства P_o

$$V_z = z V_1 \quad . \quad (6)$$

Выражение для вольтовой чувствительности составного фотодиода S_{uz} (снова в режиме согласованной нагрузки) теперь запишем в форме, аналогичной (2)

$$S_{uz} = \frac{1}{2} \frac{\eta V_z \tau}{h \nu n_o t A_d} \quad , \quad (7)$$

или с учетом (6) и (2)

Итак, при условии постоянства P_o вольтовая чувствительность фотодиода, состоящего из z элементов, в z раз больше, чем у единичного фотодиода такого же размера. Удельная обнаружительная способность, которая является другим важным параметром фотодиода, определяется из соотношения [2]

$$D^* = S_u (A_d \Delta f)^{1/2} \left/ \left(\sum_i U_{ni}^2 \right)^{1/2} \right. \quad . \quad (9)$$

где U_{ni} - напряжение шума i -го источника, Δf - полоса частот.

Предельно достижимые значения обнаружительной способности определяются доминирующим шумом фотоприемника. Сравним шумовые характеристики составного и единичного фотодиодов для случая двух фундаментальных типов шумов - генерационно-рекомбинационного (г-р) и теплового (Джонсоновского) шума. Напряжение генерационно-рекомбинационного шума для примесного CdHgTe п-типа в области частот, где $\omega\tau \ll 1$ можно записать в виде [3]

$$U_{g-r}^{(1)} = \frac{2V_1}{(t A_d)^{1/2}} \frac{(P_o \tau \Delta f)^{1/2}}{n_o} \quad . \quad (10)$$

Для составного фотодиода напряжение г-р шума запишется в виде

$$U_{g-r}^{(z)} = \frac{2V_z}{(t A_f)^{1/2}} \frac{(P_o \tau \Delta f)^{1/2}}{n_o} \quad ,$$

или с учетом (10) и (6)

$$U_{g-r}^{(z)} = z(1 - \beta)^{-1/2} U_{g-r}^{(1)} \quad . \quad (11)$$

Напряжение теплового шума для единичного фотодиода определяется формулой

$$U_J^{(1)} = (4kT R_1 \Delta f)^{1/2} \quad .$$

Для составного фотодиода сопротивление R_z определяется выражением (4), и напряжение теплового шума запишется в виде

$$U_J^{(z)} = Z(1 - \beta)^{-1/2} U_J^{(1)} \quad . \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) следует, что при малой суммарной ширине межэлементных зазоров ($\beta \ll 1$) напряжение шума возрастает пропорционально числу элементов z , как и напряжение фотосигнала. Так что отношение сигнала к шуму остается при этом постоянным. Это означает, что формирование зазоров в приемной площадке

позволяет понизить требования к шумам электронного тракта.

Подставляя выражения для напряжения шумов (11) или (12) и S_{uz} в (9), получим выражение для обнаружительной способности D_z^* составного фотодиода

$$D_z^* = \left[1 - (z - 1) d_i / \omega \right]^{1/2} D_1^* = \left(\frac{A_f}{A_d} \right)^{1/2} D_1^*, \quad (13)$$

где D_1^* - обнаружительная способность единичного фотодиода. При $d_i \rightarrow 0$ имеем $D_z^* \rightarrow D_1^*$. Обнаружительная способность фотодиода с "бесконечно узкими" зазорами приближается к значению для единичного фотодиода. При конечной ширине зазоров, D_z^* уменьшается с ростом z . Однако, при малой ширине межэлементных зазоров снижение обнаружительной способности незначительно.

Форма изготовленного методами планарной технологии фотодиода приведена на рис.1. Квадратную чувствительную площадку размерами $4 \times 4 \text{ mm}^2$ образуют три чувствительные площадки, соединенные последовательно. Формирование топологии чувствительного элемента производилось методами фотолитографии. Контактные покрытия создавались электрохимическим осаждением индия. Толщина чувствительного слоя составляла 20-25 мкм, ширина зазоров между элементами составляла 40-50 мкм. Чувствительный элемент приклеен эпоксидным клеем к германиевой подложке. Спектральная характеристика чувствительности фотодиода при $T = 77 \text{ K}$ имеет максимум около $\lambda = 11 \text{ мкм}$ (рис.2, кр.1). При значении тока смещения 12 мА вольтовая чувствительность $S_{uz\max}$ составляла 160 В/Вт. Удельная обнаружительная способность фотодиода $D_{\lambda\max}^*$ на частоте 1200 Гц составила $1,2 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$. Выполнение зазоров в фотоприемной площадке позволяет значительно уменьшить величину рабочего тока. Так, в работе [4] для фотодиода обычной конструкции с той же приемной

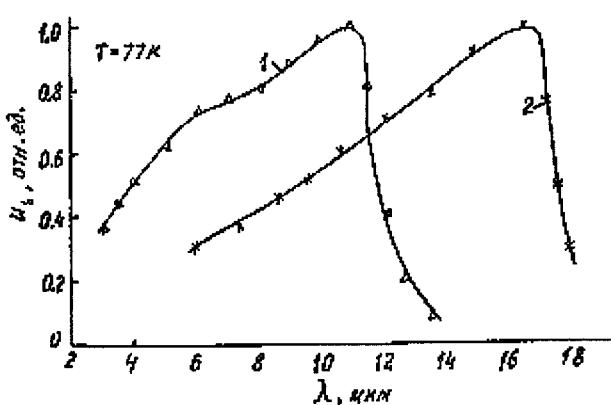


Рис.2. Спектральная характеристика чувствительности фотодиодов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$
1 - $x=0,215$ ($z=3$, $A_d=4 \times 4 \text{ mm}^2$);
2 - $x=0,19$ ($z=4$, $A_d=2 \times 2 \text{ mm}^2$).

площадкой $4 \times 4 \text{ mm}^2$ значения $S_{uz\max} = 120 \text{ В/Вт}$ и $D_{\lambda\max}^* = 1 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ были получены при токе смещения 30 мА.

На рис.2 (кр.2) приведено спектральное распределение чувствительности фотодиода, изготовленного на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x \approx 0,19$. Максимум спектральной чувствительности расположен около 16,5 мкм. Отметим, что фотодиоды обычной конструкции, изготовленные из такого состава имеют малое сопротивление ($R_{77} \approx 10 \div 15 \text{ Ом}$) и низкую вольтовую чувствительность из-за узкой запрещенной зоны и большой концентрации носителей заряда. Приемная площадка ($2 \times 2 \text{ mm}^2$) составлена из четырех элементов. Сопротивление фотодиода составило $\sim 200 \text{ Ом}$. При токе смещения 10 мА значение вольтовой чувствительности составило $S_{uz\max} = 190 \text{ В/Вт}$. Обнаружительная способность на частоте 1200 Гц составила $D_{\lambda\max}^* = 1 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$. На рис.3 приведена зависимость вольтовой чувствительности на рассеиваемой мощности для двух фотодиодов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x=0,215$ - с составной (кр.1) и единичной (кр.2) приемной площадкой. Размеры приемной площадки обоих фотодиодов одинаковы - $A_d = 1,5 \times 2 \text{ mm}^2$, число элементов составной приемной площадки $z=4$. Ясно видно, что значительное увеличение чувствительности составного фотодиода (почти точно в четыре раза) по сравнению с обычным находится в хорошем согласии с выражением (8).

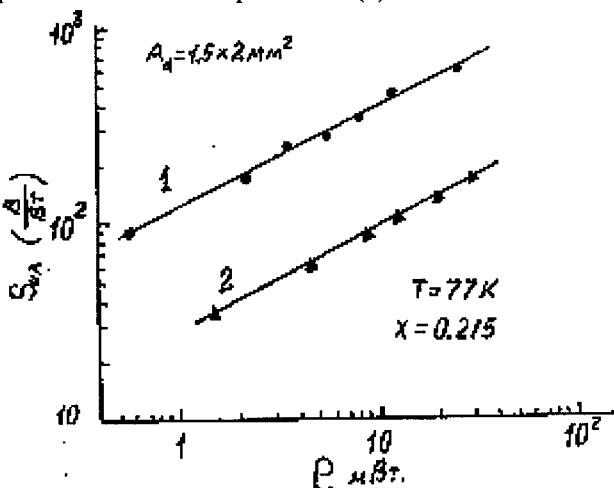


Рис.3. Зависимость вольтовой чувствительности фотодиода от рассеиваемой мощности.
1 - составной фотодиод ($z=4$);
2 - единичный фотодиод.

Таким образом, показано, что при условии постоянства рассеиваемой мощности на единицу площади вольтова чувствительность фотодиода возрастает пропорционально числу элементов, образующих его приемную площадку. На изготовленных из CdHgTe образцах охлаждаемых фотодиодов реализована их повышенная чувствительность. Рассмотренная модификация фотодиода позволяет, вместе с тем, значительно уменьшить ток и понизить требования к шумовым характеристикам усилителя.

ОХЛАЖДАЕМЫЕ ФОТОРЕЗИСТОРЫ С ЗАЗОРАМИ НА ОСНОВЕ CdHgTe

- [1] *C.T. Elliot.* "Handbook on Semiconductors", 1981, v. 4, chap. 6b, p. 729.
- [2] *R.M. Brounny, V.I. Mazurczyc.* Semiconductors and Semimetals, Acad.Press.,N.Y.,1981,v.18,chap.5,p.157.
- [3] *M.A. Kinch, S.R. Borello, A. Simmons.* Infrared Phys., 1977, v. 17, p. 127.
- [4] *E.C. Hall, J.P. Lapanne, M. Ricky.* "IEEE SOUTH-EASTCON'83. Conf. Proc., Orlando, Fla., Apr. 11-14, 1983 ". New York, N.Y., 1983,p. 635-637.

F.N. Qaziyev, Ş.M. Quliyev, R.İ. Muxtarova, E.Y. Salayev

CdHgTe ƏSASINDA ARALIQLI SOYUDULAN FOTOREZİSTORLAR

Məqalədə CdHgTe əsasında aralıqlı (meandr tipli) fotorezistorlarının işləməsi tədqiq edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, belə fotorezistorlar modifikasiyası onların volt həssaslığının yüksəlməsinə, cərəyanın azalmasına və elektron traktının küy xarakteristikalarına olan tələbatların azalmasına imkan verir. CdHgTe əsasında hazırlanmış soyudulan (77 K-dək) fotorezistorların fotoelektrik parametrləri göstərilmişdir.

F.N. Kaziyev, Sh.M. Kuliyev, R.I. Mukhtarova, E.Y. Salayev

COOLED PHOTORESISTORS WITH GAPS ON THE CdHgTe BASE

The work of the cooled photoresistors on CdHgTe base with sensitive area (meandre type) is analysed. It is established that application of such photoresistors modification increases it's sensitivity the operating current and requirements to the amplifier noise voltage. The analytical consideration of the operation of the detector has been carried out. The main photoelectrical parameters are presented for cooled (up to 77 K) CdHgTe photoresistors with gaps for the range 8-12 and 12-17 μm .