

НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ ФОТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ CdHgTe

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

НИИ Фотозлектроники АН Азерб. Республики

370602, ГСП, Баку, ул.Ф.Агаева, 555 квартал

Описана модификация неохлаждаемого фотоэлектроманитного детектора для инфракрасного диапазона, позволяющая повышать его вольтговую чувствительность. Проведен теоретический анализ работы фотодетектора. Приведены результаты измерений фотоэлектрических параметров и характеристик неохлаждаемого фотодетектора, изготовленного на основе CdHgTe для диапазона спектра 3-7 мкм.

Фотоэлектроманитные (ФЭМ) детекторы для инфракрасного (ИК) диапазона изготавливаются обычно на основе антимонида индия - узкозонного полупроводникового материала с высокой подвижностью носителей заряда [1]. В последнее время получили развитие также ФЭМ детекторы на основе полупроводниковых твердых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ- CdHgTe) [2,3]. Фотоприемники этого типа имеют определенные преимущества перед неохлаждаемыми фотопроводящими детекторами. Отсутствие источников питания обуславливает низкий уровень шума, а также снижает тепловую нагрузку на прибор. В то же время, из-за малого времени жизни носителей заряда и высокой их равновесной концентрации в указанных материалах при комнатной температуре, вольтговая чувствительность приборов этого типа низка. Неохлаждаемые ФЭМ детекторы на основе КРТ используются в оптико-электронных системах, связанных с применением CO₂-лазеров.

В настоящей работе приведены конструкция и результаты исследований новой модификации ФЭМ детектора, позволяющей повышать его вольтговую чувствительность. Приведены фотоэлектрические параметры изготовленного неохлаждаемого ФЭМ детектора на основе монокристаллов CdHgTe.

1. Анализ работы ФЭМ детектора.

Пусть на фотоприемную площадку ФЭМ детектора $A_d = wxl$ (w -ширина, а l -длина приемной площадки) падает поток монохроматического излучения W_λ . Предполагаем, что толщина образца t значительно больше длины амбиполярной диффузии ($t \gg L_D$) и будем рассматривать случай низкого уровня оптического возбуждения. В случае слабого магнитного поля ($\mu B \ll 1$) и при условии сильно поглощае-

мого излучения ($\alpha L_D \gg 1$, α -коэффициент поглощения света) выражение для напряжения сигнала ФЭМ эффекта (в режиме разомкнутой цепи) можно записать в виде [4,5]

$$U_s = \eta \Phi_0 \frac{(b+1)BL_D l}{(bn+p)t} \quad (1)$$

где, η - квантовый выход, Φ_0 - число фотонов сигнала, падающих за 1 сек. на 1 см² поверхности образца, B - магнитная индукция, n и p - концентрации электронов и дырок, соответственно, b - отношение подвижностей электронов и дырок ($b = \mu_n / \mu_p$).

Длина амбиполярной диффузии определяется выражением

$$L_D = \left(\frac{n+p}{bn+p} D_n \tau \right)^{1/2} \quad (2)$$

где D_n - коэффициент диффузии электронов.

В выражении (1) принято, что скорость поверхностной рекомбинации s мала ($s\tau/L_D \ll 1$), частота модуляции оптического излучения ω такова, что $\omega\tau \ll 1$, а механизм рекомбинации таков, что времена жизни электронов и дырок одинаковы $\tau_n = \tau_p = \tau$.

В соответствии с (1), выражение для вольтговой чувствительности ФЭМ детектора S_s запишется в виде

$$S_s = \frac{U_s}{W_\lambda} = \frac{\eta(b+1)BL_D}{hv(bn+p)wt} \quad (3)$$

где hv - энергия фотона падающего излучения.

Предположим теперь, что заданная фотоприемная площадка может быть разделена параллельно линиям тока на одинаковые элементы в форме удлиненного прямоугольника (длиной l). Соединенные последовательно, эти элементы образуют единую квазинепрерывную чувствительную площадку (рис.1) Рассмотрим, как изменяются основные фотоэлектрические параметры

детектора (вольтовая чувствительность, напряжение шумов, обнаружительная способность) с изменением числа элементов, образующих его фотоприемную площадку. Сделаем следующие предположения.

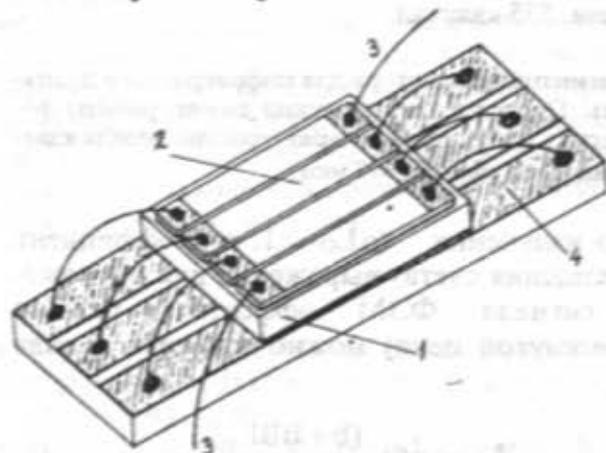


Рис.1. Конфигурация неохлаждаемого ФЭМ - детектора. 1-подложка, 2-фотоприемная площадка с зазорами, 3 - электрические выводы, 4 - растр контактный.

1. Полный размер фотоприемной площадки $A_d = wxl$ и ширина зазора между элементами d_1 принимаются постоянными величинами. Переменными величинами принимаются число элементов z и ширина каждого элемента. Так что увеличение числа элементов фотодетектора заданной площади достигается за счет уменьшения ширины каждого элемента.

2. Полагаем, что все элементы по фотозлектрическим параметрам идентичны. Ширина и длина каждого элемента значительно больше его толщины. Краевыми эффектами пренебрегаем.

Сопротивление ФЭМ детектора с зазорами R_z и сопротивление единичного ($z=1$) фотодетектора R_1 той же площади связаны соотношением

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

где β - отношение суммарной ширины зазоров к полной ширине фотодетектора

$$\beta = (z-1) d_1 / w.$$

Последовательное соединение чувствительных элементов в блоке выполняется таким образом, чтобы имело место суммирование сигналов каждого элемента U_i , так что величина полного ФЭМ сигнала U_{Σ} будет равна $U_{\Sigma} = zU_i$. С другой стороны, напряжение сигнала ФЭМ эффекта для обычного (единичного) фотодетектора U_{i1} , согласно выражению (1), пропорционально

длине чувствительной площадки l и не зависит от ее ширины, так что $U_i = U_{i1}$. Отсюда следует, что при одинаковой облученности напряжение ФЭМ сигнала фотодетектора U_{Σ} , состоящего из z элементов в z - раз больше сигнала U_{i1} единичного ($z=1$) фотодетектора той же площади $U_{\Sigma} = zU_{i1}$. Вольтовая чувствительность ФЭМ детектора с зазорами S_{Σ} будет в z раз больше чувствительности единичного фотодетектора

$$S_{\Sigma} = zS_{i1} \quad (5)$$

Основным параметром фотоприемника является удельная обнаружительная способность, которая определяется из соотношения [1]

$$D^* = S_{\Sigma} (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / (\sum \bar{U}_{\Sigma i}^2)^{1/2} \quad (6)$$

где $U_{\Sigma i}$ - напряжение шума i -го источника, Δf - полоса частот.

Предельно достижимые значения обнаружительной способности определяются доминирующим шумом фотоприемника. Шумовые характеристики ФЭМ детектора определяются, в основном, тепловыми (Джонсоновскими) шумами [5]. Напряжение теплового шума определяется формулой Найквиста-Джонсона

$$U_n = (4kTR \cdot \Delta f)^{1/2} \quad (7)$$

где k - постоянная Больцмана, T - рабочая температура фотодетектора.

Для ФЭМ детектора с зазорами сопротивление R_z дается формулой (4) и напряжение теплового шума запишется в виде

$$U_{\Sigma n} = z(1 - \beta)^{-1/2} \cdot U_{n1} \quad (8)$$

где U_{n1} - напряжение шума единичного ($z=1$) фотодетектора.

При малой величине суммарной ширины зазоров ($\beta \ll 1$) напряжение шума возрастает пропорционально z (так же как и напряжение фотосигнала). При этом отношение сигнала к шуму остается приблизительно постоянным при увеличении числа элементов фотодетектора.

Выражение для удельной обнаружительной способности D^*_z , ограниченной тепловыми шумами, запишется в виде

$$D^*_z = D^*_1 (1 - \beta)^{1/2} = D^*_1 |1 - (z-1)d_1 / w|^{1/2} \quad (9)$$

где D^*_1 - удельная обнаружительная способность единичного фотодетектора $D^*_1 = S_{i1} (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / U_{n1}$

Выражение для D^*_1 получается подстановкой S_{a1} и U_{a1} из формул (3) и (7)

$$D^*_1 = \frac{\eta B}{2h\nu} \cdot \frac{b+1}{bn+p} \left[\frac{(n+p)\mu_n\mu_p\tau}{t} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Обнаружительная способность ФЭМ детектора с зазорами D^*_z , согласно (9), определяется его фотоактивной площадью $A_z = A_d(1-\beta)$. Увеличение числа элементов, образующих заданную фотоприемную площадку A_d , приводит, согласно (9), к уменьшению удельной обнаружительной способности. Однако при малой суммарной ширине межэлементных зазоров снижение D^*_z незначительно. Так, например, при $(z-1)d_1 \ll 0,1w$ различие между D^*_z и D^*_1 не превышает 5%.

2. Конструкционные построение и фотоэлектрические параметры детектора.

Из выражений (3) и (10) следует, что в случае $b \gg 1$ (что обычно выполняется для КРТ) с точки зрения повышения предельных значений фотоэлектрических параметров выгоднее изготавливать фотодетектор на основе материала р-типа, удовлетворяющего условию оптимального легирования $p \approx n_i b^{1/2}$, n_i -концентрация собственных носителей заряда. Нетрудно показать, например, что отношение вольтовой чувствительности ФЭМ детектора S^*_p на основе материала р-типа, удовлетворяющего условию $p \approx n_i b^{1/2}$ к вольтовой чувствительности S^*_n детектора такой же геометрии, на основе материала с собственной проводимостью ($p=n=n_i$), приближенно имеет вид

$$\frac{S^*_p}{S^*_n} \approx \frac{(b+1)^2}{4b} \cdot \left(\frac{\tau^p}{\tau^n} \right)^{1/2} \quad (11)$$

где, τ^n и τ^p - времена жизни носителей заряда в материале "собственном" и материале р-типа, соответственно.

Из выражения (11) следует, что в случае $b \gg 1$ (в КРТ $b \sim 100$) S^*_p может заметно превышать S^*_n даже при $\tau^p < \tau^n$.

Фоточувствительные элементы (ФЧЭ) изготавливались нами на основе монокристаллов $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ р-типа с концентрацией акцепторов $p = (0,8 \div 1) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При комнатной температуре проводимость такого материала является смешанной (слабый р-тип). Образцы р-типа получались

нами путем диффузионного легирования исходных монокристаллических пластин КРТ серебром (или медью).

Доминирующим механизмом рекомбинации в монокристаллах КРТ ($x \approx 0,2$) слабого р-типа при комнатной температуре является межзонная ударная рекомбинация с участием двух электронов и тяжелой дырки и, одновременно, с участием двух дырок и электрона [6]. Из совместных измерений фотопроводимости и ФЭМ эффекта [4] были определены время жизни неравновесных носителей заряда $\tau \approx (0,5 \div 0,7) \cdot 10^{-9} \text{ с}$ и длина амбиполярной диффузии $L_D \approx 5 \text{ мкм}$ при $T = 295 \text{ К}$.

Общий вид изготовленного образца фотодетектора приведен на рис.1. Квадратную фотоприемную площадку фотодетектора размерами $2 \times 2 \text{ мм}^2$ образуют четыре одинаковые чувствительные площадки в форме удлиненного прямоугольника. Чувствительный элемент приклеен эпоксидным клеем к кремниевой подложке. Толщина чувствительного элемента составляет около 20 мкм, а ширина зазоров между элементами $40 \div 50 \text{ мкм}$. Формирование топологии чувствительных элементов производилось методами фотолитографии. Подложка с чувствительным элементом монтируется на контактном растре специальной конфигурации для распайки элементов последовательно с таким расчетом, чтобы имело место суммирование ФЭМ сигналов. Контактный растр представляет собой сапфировую пластину в форме удлиненного параллелепипеда шириной, примерно равной ширине блока чувствительных элементов, с нанесенными на нее полосами металлизации - токоведущими дорожками. Число таких дорожек равно числу зазоров в фотоприемной площадке. Контакты к чувствительным элементам осуществляются подпаянными золотыми проволоками диаметром 20 мкм. Способ коммутации чувствительных элементов посредством контактных дорожек растра показан на рис. 1. Токоведущие дорожки растра проходят под подложкой блока ФЧЭ. Такое конструктивное исполнение позволяет размещать блок ФЧЭ вместе с контактном растром в узком (около 2 мм) зазоре постоянного магнита.

Сопротивление фотодетектора составляло около 340 Ом при $T = 295 \text{ К}$. На рис. 2 представлена измеренная в магнитном поле $B = 0,6 \text{ Тл}$ спектральная характеристика чувствительности фотодетектора при

комнатной температуре. Спектральная характеристика приведена к одинаковой мощности падающего излучения. Максимум спектральной чувствительности расположен в районе 6,5÷7 мкм. Значение монохроматической вольтовой чувствительности на длине волны максимума чувствительности $S_{\lambda_{max}}$ и удельной обнаружительной способности $D_{\lambda_{max}}^*$ (на частоте 1200 Гц) составили $S_{\lambda_{max}} = (0,8 \pm 1,0)$ В/Вт и $D_{\lambda_{max}}^* = (0,7 \pm 0,9) \cdot 10^4$ см·Гц^{1/2}Вт⁻¹.

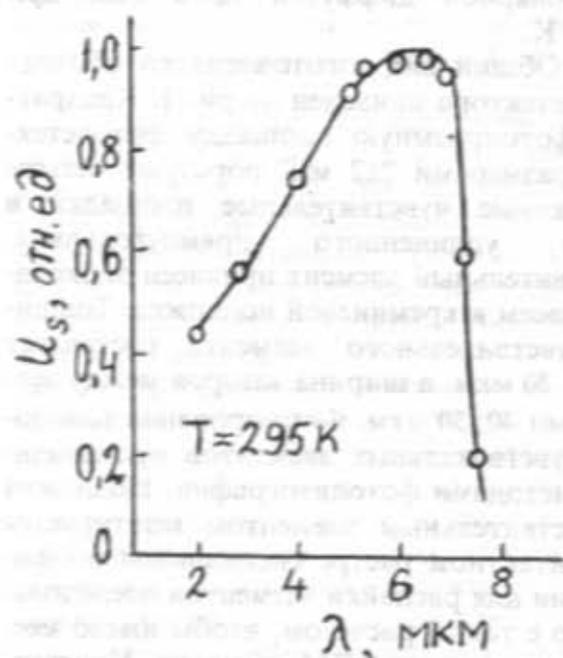


Рис.2. Спектральная характеристика чувствительности неохлаждаемого ФЭМ детектора на основе Cd₂Hg_{1-x}Te (x≈0,2). Мощность падающего излучения постоянна.

Результаты проведенного в п.1 анализа подтверждаются данными измерений на рис.3. Напряжение сигнала ФЭМ эффекта, как видно из рис.3, возрастает пропорционально числу включенных в измерительную цепь чувствительных элементов, т.е. ширине фотоприемной площадки. Известно, что простое увеличение ширины единичного ФЭМ детектора не увеличивает фотосигнал и приводит к снижению его вольтовой чувствительности [5,7].

Таким образом показано, что предложенная модификация ФЭМ детектора позволяет существенно увеличить (до 3÷5 раз) его вольтовую чувствительность по сравнению с обычным фотодетектором такой же площади, без заметного снижения его обнаружительной способности.

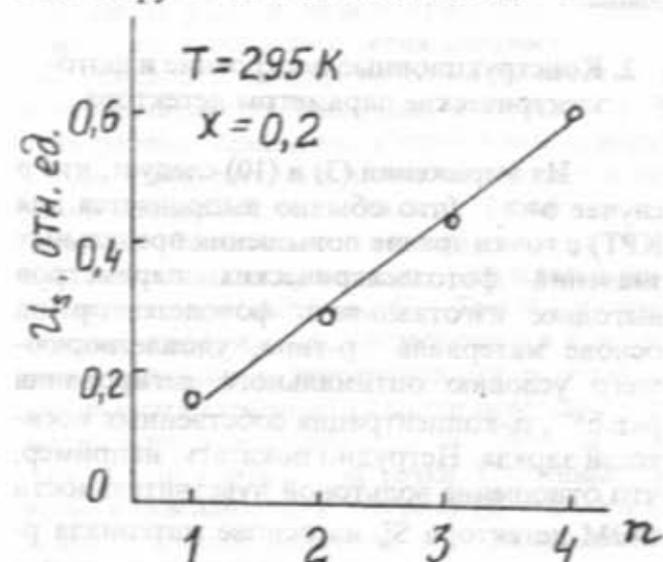


Рис.3. Зависимость ФЭМ сигнала от числа включенных в измерительную цепь фоточувствительных элементов детектора.

1. С.Т.Еллиот, Handbook on semiconductors, 1981, vol.4, chap.6b, p.729.
2. W.Galus, F.Perry, Laser Focus, 1984, vol.20, № 11, p.76.
3. M.Grudzien, K.Yozwikowsky, J.Piotrowsky, Infrared Phys., 1985, vol.25, № 2, p.329.
4. Р.Смит "Полупроводники", М. "Мир", 1982, гл. 10, с.392
5. Шоль Ж., И.Марфан, М.Мюкш и др. "Приемники инфракрасного излучения", М. "Мир", 1969, гл. 1, с.94.
6. Н.С.Барышев, Б.Л.Гельмонт, М.И.Ибрагимова, ФТП, 1990, т.24, в.2, с.209.
7. Т.Мосс, Г.Баррел, Б.Эллис Полупроводниковая оптоэлектроника, М., "Мир", 1976, с.193.

