

УДК 621.383

Чувствительность длинноволнового фотоприемника на основе структур с квантовыми ямами при комнатной температуре

В. Б. Куликов, В. П. Котов, О. Ф. Бутягин, О. Б. Чередниченко

Представлены результаты экспериментального исследования чувствительности длинноволнового фотоприемника (ФП) на основе структур с квантовыми ямами (СКЯ) при комнатной температуре. Приведены оценки чувствительности ФП СКЯ с оптимизированной спектральной характеристикой и другими конструктивными усовершенствованиями. Показано, что чувствительность ФП СКЯ при этом может быть увеличена в сотни раз по сравнению с полученной, а обнаружительная способность такого ФП СКЯ может быть сопоставима и даже превышать таковую для микроболометрических ФП.

PACS: 03.70.+k; 85.60.-q

Ключевые слова: фотоприемник, чувствительность, квантовая яма, температура.

Введение

Большинство применений инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) длинноволнового диапазона (8—12 мкм), включая ФП на основе СКЯ, связано с тепловидением. В этой области применений от ФП требуются очень высокая чувствительность и большое количество чувствительных элементов в матрице ($\sim 10^6$). Для достижения высокой чувствительности длинноволновые ИК-ФП, как правило, необходимо охлаждать до температур ~ 77 К, а ФП-СКЯ и до 60—65 К.

Необходимость глубокого охлаждения ИК-ФП значительно увеличивает их стоимость и ограничивает число областей применения. Между тем существуют области применения, где не требуются матрицы большого формата с пороговой чувствительностью, близкой к предельно возможной, а значительно более важной является возможность работы ФП при повышенных температурах, вплоть до комнатной. В этом случае ФП может иметь весьма экономичные массогабаритные, энергетические и ценовые показатели и использоваться в портативной аппаратуре как гражданского, так и военного применения, например в составе лазерных целеуказателей.

Исследования чувствительности ФП-СКЯ при температурах, существенно более высоких, чем 77 К, до недавнего времени имели крайне ограниченный характер. За последнее время наиболее

интересные, по нашему мнению, результаты получены в работе [1].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования чувствительности длинноволнового ФП-СКЯ к излучению CO_2 -лазера при комнатной температуре, а также приведена оценка чувствительности такого ФП в случае оптимизации его спектральной характеристики.

Образцы фотоприемников на основе СКЯ

Структуры с квантовыми ямами, использованные для изготовления одноэлементных ФП, были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Они имели 50 периодов яма—барьер — $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0,27$), а также верхний и нижний контактные слои. Ямы имели толщину 5, а барьеры — 45 нм. Яма легировалась кремнием до концентрации $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Из указанных СКЯ методом ионно-химического травления изготавливались одноэлементные ФП, имевшие форму мезы размером 400×400 мкм. Омические контакты к верхнему и нижнему контактному слоям изготавливались из вожженного сплава Au:Ge и сверху покрывались Au . Специальных устройств ввода излучения в ФП-СКЯ — дифракционной решетки или сошлифованного под углом 45° торца изготовлено не было, поскольку, как показано в [2], ФП-СКЯ, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии, обладают весьма заметной чувствительностью к излучению, падающему нормально к поверхности ФП-СКЯ.

Результаты и обсуждение

У изготовленных указанным образом одноэлементных ФП-СКЯ проводили измерение спектров

Куликов Владимир Борисович, нач. отдела.
Котов Виталий Павлович, ведущий инженер.
Бутягин Олег Федорович, главный специалист.
Чередниченко Олег Борисович, ведущий научный сотрудник.
НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха.
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.
Тел. (495) 333-03-67. E-mail: vokul@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2009 г.

фоточувствительности с помощью спектрофотометра на базе монохроматора МДР-41. Спектр фоточувствительности ФП-СКЯ при температуре 77 К представлен на рис. 1. Отметим, что приведенная к максимуму спектра обнаружительная способность указанного ФП, рассчитанная на основе измерений при 65 К, составила $1,2 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$.

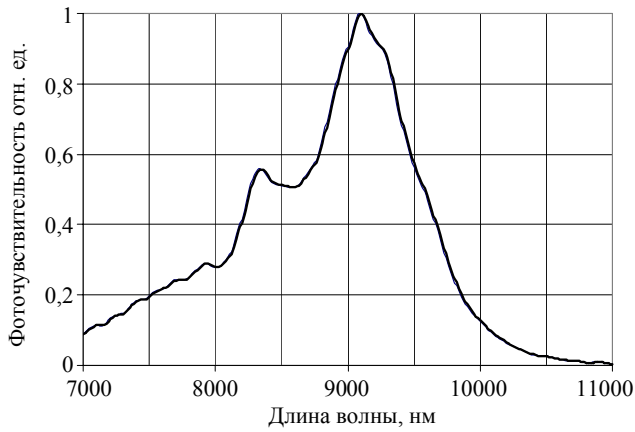


Рис. 1. Спектр фоточувствительности ФП-СКЯ

В качестве источника излучения в экспериментах по измерению абсолютной чувствительности ФП при комнатной температуре использовался CO₂-лазер типа LCD-15, работающий в непрерывном режиме, с максимальной мощностью излучения 15 Вт в пучке диаметром около 2 мм. С помощью аттенюатора мощность в несфокусированном пучке уменьшалась до такого уровня, что на входную поверхность ФП-СКЯ попадало лишь около 16 мВт.

Излучение от лазера модулировалось механическим модулятором с частотой 1160 Гц. Напряжение смещения подавалось на ФП через нагрузочное сопротивление величиной 9,8 Ом, с которого переменная составляющая напряжения поступала на вход селективного вольтметра У2-8.

На рис. 2 и 3 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости чувствительности ФП-СКЯ от напряжения смещения при различных его полярностях, соответственно. Характеристики обоих типов обладают заметной асимметрией, что, возможно, связано с асимметрией и непрямоугольностью границ яма—барьер [3].

Очень низкие значения абсолютной чувствительности ФП связаны прежде всего с тем, что его чувствительность вблизи длины волны излучения лазера 10,6 мкм составляет ~3 % от чувствительности в максимуме спектра. Это означает, что за счет подстройки максимума спектра фоточувствительности на длину волны 10,6 мкм можно повысить чувствительность, по крайней мере, в 30 раз.

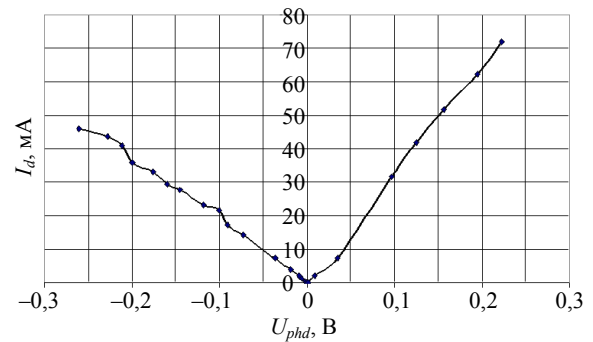


Рис. 2. ВАХ ФП-СКЯ при разных полярностях

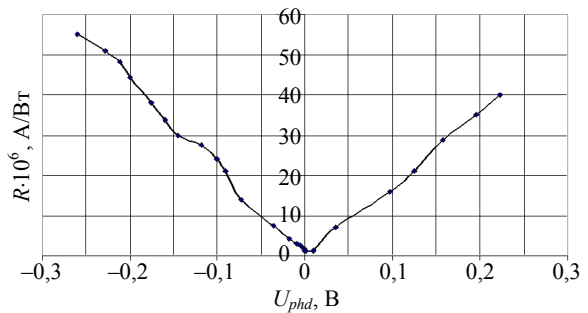


Рис. 3. Зависимости абсолютной чувствительности ФП-СКЯ от напряжения смещения

Кроме того, ширина спектра фоточувствительности по уровню 0,5 исследованного ФП-СКЯ составляет около 2 мкм (оптические переходы, скорее всего, осуществляются между нижним связанным уровнем и квазисвязанным состоянием, расположенным вблизи верхнего края ямы), тогда как спектр излучения лазера на несколько порядков уже.

Это приводит к тому, что в генерации свободных носителей участвует лишь малая доля оптических переходов. Сужение спектра чувствительности путем перевода верхнего состояния из квазисвязанного в связанное, чего можно добиться, например, увеличением высоты барьеров, позволит в несколько раз увеличить число оптических переходов, возбуждаемых излучением с длиной волны 10,6 мкм. Возможность такого способа увеличения чувствительности обусловлена действием эмпирического закона сохранения суммы осцилляторов, суть которого отражает соотношение

$$\alpha_p (\Delta\lambda/\lambda_p)/N_d \sim \text{const},$$

где α_p — коэффициент поглощения в максимуме спектра;

$\Delta\lambda$ — ширина спектра на полувысоте;

λ_p — длина волны максимума спектра;

N_d — концентрация активной легирующей примеси в яме [4].

Использование устройства ввода излучения в ФП-СКЯ в виде, например, дифракционной ре-

шетки, удаление подложки, увеличение числа периодов яма—барьер и уровня легирования ямы позволят еще в 10—15 раз поднять чувствительность ФП. Таким образом, чувствительность может быть увеличена более чем в 1000 раз и достигнуть $\sim 0,1$ А/Вт.

Оценим обнаружительную способность такого гипотетического ФП на длине волны 10,6 мкм в предположении, что доминирующими шумами в нем будут джонсоновский (ДШ) и генерационно-рекомбинационный (ГРШ):

$$D^* = (R \cdot A^{1/2} \Delta f^{1/2}) (I_j^2 + I_{gr}^2)^{-1/2}, \quad (1)$$

где R — абсолютная чувствительность ФП, А/Вт;
 I_j и I_{gr} — шумовые токи, связанные с ДШ и ГРШ, соответственно;

A — площадь ФП;

Δf — полоса частот, в которой регистрируется шум.

После несложных преобразований (1) выражение для обнаружительной способности можно представить как

$$D^* = [(R/2) \cdot A^{1/2}] \cdot [(kT/U_f + e \cdot g) \cdot I_d]^{-1/2}, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана;

T — температура;

U_{phd} — напряжение на ФП;

e — заряд электрона;

g — коэффициент фотоэлектрического усиления ФП;

I_d — его темновой ток.

Из зависимости, приведенной на рис. 2, для величины напряжения $U_{phd} = 0,26$ В имеем $I_d = 4,6 \cdot 10^{-2}$ А. С учетом реализации указанных выше мер повышения чувствительности ФП-СКЯ используем значение $R = 0,1$ А/Вт. Подставляя эти величины в (2) и учитывая, что в нашем случае

$A = 1,6 \cdot 10^{-3}$ см², $g = 0,1$ (типичное значение величины g для ФП-СКЯ), получаем $D^* \approx 0,5 \cdot 10^8$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}.

Такое значение D^* сравнимо с аналогичным показателем для микроболометрических ФП. Это означает, что при создании подходящего матричного мультиплексора для такого ФП-СКЯ можно получить относительно дешевый неохлаждаемый матричный ФП, который по сравнению с тепловыми матричными ФП будет обладать рядом преимуществ, например, значительно меньшей инерционностью и более высокой механической стойкостью.

Заключение

Представлены результаты экспериментального исследования чувствительности длинноволнового ФП на основе СКЯ при комнатной температуре. Оценки чувствительности ФП-СКЯ с оптимизированной спектральной характеристикой и конструктивными усовершенствованиями показывают, что она может быть увеличена в сотни раз по сравнению с полученной. При этом обнаружительная способность может быть сопоставима с таковой для микроболометрических ФП.

Авторы выражают благодарность

А. А. Мармалюку и Ю. В. Курнякко за помощь в изготовлении ФП-СКЯ.

Литература

1. Richardson R. K., Hutchinson D., Bennett C. A. // Proc. of SPIE. 2003. V. 4820. P. 250.
2. Куликов В. Б., Аветисян Г. Х. и др. // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 2. С. 218.
3. Куликов В. Б., Будкин И. В. // Прикладная физика. 2003. № 5. С. 79.
4. Levine B. F. // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. 1.

Responsivity of long wavelength qwpip at room temperature

V. B. Kulikov, V. P. Kotov, O. F. Butyagin, O. B. Cherednichenko

FSUE «M. F. Stelmakh R&D Institute “Polyus”»,

3 Vvedensky str., 117432, Moscow, Russia

E-mail: vokul@inbox.ru

The experimental results of long wavelength quantum well photodetectors (QWIPs) responsivity investigation at room temperature are presented. The expected values of QWIPs responsivity with optimized spectra and design are evaluated. The detectivity of such QWIPs can be comparable with microbolometric photodetectors one.

PACS: 03.70.+k; 85.60.-q

Keywords: photodetector, sensitivity, quantum well, temperature.

Bibliography — 16 references.

Received 28 May 2009