Uzbek Journal of Physics

Vol.22(№1) 2020 PP.33-38

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ

А.В. Каримов[1], Ф.А. Гиясова[1], Д.М. Ёдгорова[1,2], О.А. Абдулхаев[1,2]

[1]Физико-технический институт АН РУз, 100084 Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, 2б; Узбекистан, karimov@uzsci.net

[2]НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУ Уз, 100057 Ташкент, ул. Янги Алмазор, 20; Узбекистан

(Получена 03.07.2019)

Фотосезгир гетероўтишли Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au тузилмаларнинг турли уланиш режимларидаги тадқиқот натижалари келтирилган. Турли сатҳлари ёритилганда 0.85–0.9 мкм ва 1.31–1.55 мкм спектрал диапазонда фотсезгирлиги фарқланиши, қаршилиги юқори бўлган галлий арсениддаги фотогенерацион жараёнлар ва металлдан яримўтказгичга узатиладиган фотоэмиссион жараёнларга боғлиқлиги тажрибада кўрсатилган.

Приводятся результаты исследования фоточувствительности гетеропереходной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры при различных режимах включения. Экспериментально показано, независимо от возбуждаемой поверхности, они отличаются фоточувствительностью в спектральном диапазоне 0.85–0.9 мкм и 1.31–1.55 мкм, что связано с фотогенерационными процессами в высокоомном арсениде галлия и фотоэмиссионными процессами из металла в полупроводник.

The research results of photosensitivity of Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au heterojunction structure under various electrical circuit configuration are presented. It is experimentally shown that irrespective of the excited surface, they differ in photosensitivity in the spectral range of 0.85-0.9 μm and 1.31–1.55 μm, which is associated with photogeneration processes in high-resistance gallium arsenide and photoemission processes from metal to semiconductor.

В настоящее время основной технологией изготовления фотоэлектрических приборов на основе твердых растворов соединений $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$ являются дорогостоящие и сложные методы газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ) и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [1]. Внимание многих исследователей обращено к поиску более простых альтернативных методов получения полупроводниковых структур [2]. В то же время относительно простыми и незатратными методами получения фоточувствительных гетероструктур представляются жидкофазная эпитаксия, ионно-лучевая кристаллизация и лазерная кристаллизация [3].

При этом немаловажным является выбор базовой области, хотя в случае широкозонного материала можно было бы получить определенные преимущества, если преодолеть низкую подвижность носителей заряда и влияние различий параметров решеток [4]. С этих позиций в исследуемой многослойной фотодиодной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуре пленочные гетерослои, особенно примыкающий к объемному арсениду галлия слой, сформированы с близкой к металлической проводимостью [5], то есть прилагаемое к структуре электрическое поле падает в высокоомной базовой области, что предопределяет

протекание в нем физических процессов и сравнительно простую технологию изготовления гетероструктур.

Как известно [6], в идеальном случае фоточувствительность полупроводниковой структуры определяется тем, что если один падающий фотон создает одну электронно-дырочную пару, тогда квантовый выход фотодиода будет равен единице. Для фотовольтаического элемента спектральные характеристики определяются зависимостью фототока короткого замыкания или напряжения холостого хода от мощности монохроматического излучения.

Зависимости фототока от напряжения в резисторных структурах имеют линейный характер, а в фотодиодной структуре – насыщающийся характер, то есть кривые световых токов параллельно смещаются в область больших значений токов пропорционально интенсивности светового излучения. В отличие от них, в лавинных фотодиодах зависимости фототока от напряжения с приближением к напряжению пробоя приобретают нарастающий характер. Однако им свойственна зависимость коэффициента умножения от рабочего режима и температуры, что требует стабилизации рабочего режима [7]. В последнее время внимание исследователей обращено к пленочным структурам на основе сульфида кадмия и фосфида индия, которые изготавливаются сравнительно простой технологией, в том числе вакуумным напылением [8, 9].

В настоящей работе приведены результаты исследования некоторых особенностей фоточувствительности многослойной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры при различных режимах включения рабочего напряжения и при воздействии интегрального и монохроматического излучения.

Экспериментальные образцы и результаты исследования.

Исследуемые структуры изготовлены методом термического нанесения пленок *n*CdS и *n*InP из измельченных кристаллов толщиной 0.4 мкм на монокристаллическую полуизолирующую подложку из арсенида галлия толщиной 400 мкм, легированного кислородом. Выпрямляющие контакты из Au нанесены вакуумным напылением на фронтальную и тыльную стороны структуры поверхности.

Токовые характеристики. Экспериментальные зависимости фототока в исследуемых нами Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структурах при монохроматическом освещении излучением длиной волны 1.2 мкм от напряжения приведены на рис. 1.

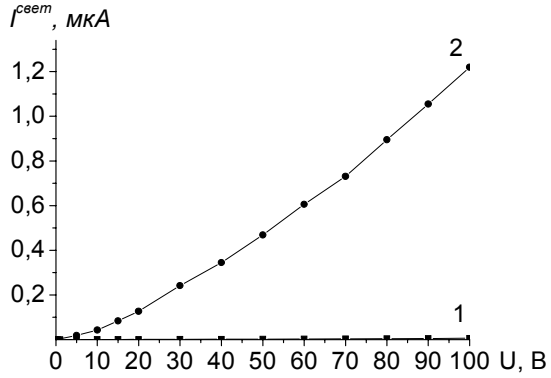


Рис. 1. Зависимость спектрального фототока от рабочего напряжения при возбуждении монохроматическим светом с λ=1.2 мкм со стороны запираемого Au-νGaAs:O перехода. Кривая 1 – в темноте, кривая 2 – при освещении.

Для сравнения приведена также вольтамперная характеристика исследуемой фотодиодной структуры в одном из режимов включения в темноте (кривая *1*).

Из рисунка видно, что по мере увеличения рабочего напряжения фототок, то есть разность монохроматического светового и темнового токов, возрастает

$$I^{ф} = I^{св} - I^{тем}, \tag{1}$$

стремясь к суперлинейной зависимости (рис. 1, кривая *2*), что подтверждает наличие эффекта усиления первичного фототока.

Коэффициент фотоэлектрического усиления [10], т.е. отношение фототока к первичному фототоку, можно представить в виде

$$M^{ф} = \frac{J^{ф}}{J^{ф0}} = \frac{J^{св} - J^{тем}}{J^{св}_{\min} - J^{св}_{\min}}. \tag{2}$$

Его значение увеличивается с повышением рабочего напряжения и дает наибольшее усиление при возбуждении со стороны прямосмещаемого и запираемого *n*InP-Au-перехода. При этом для исследуемой структуры, как показано в таблице, значение коэффициента усиления первичного фототока с рабочим напряжением приобретает нарастающий характер, то есть данную структуру можно использовать с предварительным согласующим каскадом.

Таблица. Зависимости коэффициента усиления первичного фототока от рабочего напряжения.

U, В	$J^{тем}$, мкА	$J^{св}$, мкА	$I^{ф} = I^{св} - I^{тем}$	$M^{ф} = J^{ф} / J^{ф0}$
1	0.0003	0.0005	0.00049	1.01
5	0.0005	0.019	0.0185	37.8
10	0.00067	0.043	0.0423	86.3
15	0.0009	0.084	0.0831	170
20	0.0012	0.127	0.126	257
30	0.0016	0.242	0.24	490
40	0.002	0.345	0.343	700
50	0.0025	0.469	0.467	953
60	0.0029	0.606	0.603	1230
70	0.0034	0.731	0.728	1490
80	0.0044	0.895	0.891	1820
90	00053	1.055	1.05	2140
100	0.0064	1.22	1.21	2470

λ = 1.2 мкм, $\Phi \rightarrow$ Au-ν̃GaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au.

Спектральные характеристики многослойной фоточувствительной структуры Au-ν̃GaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au отличаются следующим. В режиме запирания Au-ν̃GaAs:O-перехода при подсветке со стороны объемного арсенида галлия, а также *n*InP-Au-перехода в спектральной характеристике пик, связанный с оптическим переходом зона-зона арсенида галлия (0.86 мкм), не заметен (рис. 2, кривая 1). Однако в области 1.3–1.5 мкм создается полочка, спектральный фототок, который возрастает с увеличением величины запираемого напряжения, что связано с эмиссией генерированных электронов из (металла) Au в (полупроводник) ν̃GaAs.

Соответственно, по мере увеличения толщины обедненного слоя под металлом имеем тем больший фототок, как приведено на рис. 2.

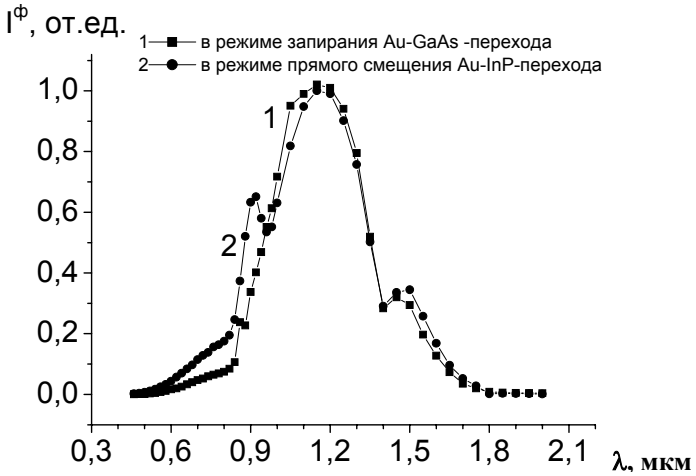


Рис. 2. Спектральная характеристика Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры.

В режиме прямого смещения Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры и при подсветке со стороны *n*InP-Au-перехода пик, связанный с переходом зона-зона, становится ярко выраженным и во всем спектральном диапазоне наблюдается синхронное увеличение спектрального фототока (рис. 2, кривая 2) с преобладанием роста максимального фототока, обусловленного возбуждением носителей с примесного уровня [11]. При этом также проявляется полочка, связанная с эмиссией генерированных электронов из металла (Au) в полупроводник *n*InP. При этом высота Au-*n*InP барьера, можно полагать, остается неизменной.

Сопоставление спектральных характеристик Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры при различных режимах включения указывает на то, что фотогенерационные процессы в обоих режимах протекают в более высокоомной базовой области из арсенида галлия толщиной 400 мкм.

В соответствии с исходными данными материалов многослойной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры можно построить качественную энергетическую зонную диаграмму. Фактически в исследуемой структуре между полупроводниковыми областями образуются изотипные гетеропереходы (νGaAs-*n*CdS-*n*InP) ν-*n*-*n*-типа, где переход (*m*-ν и *n*-*m*) между полупроводниками и металлом Au является выпрямляющим.

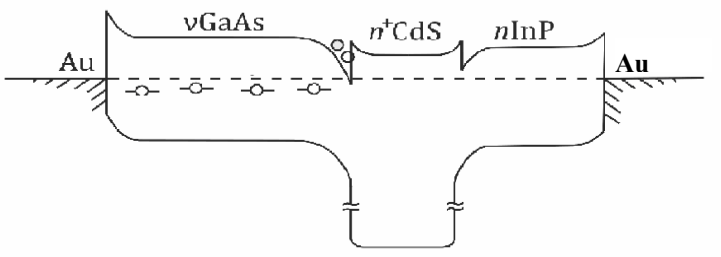


Рис. 3. Энергетическая зонная диаграмма Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры в равновесном состоянии.

В равновесном состоянии энергетическую зонную диаграмму Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры можно представить, как приведено на рис. 3. Слои сульфида кадмия после осаждения вакуумным напылением не активированы, поэтому они имеют сравнительно низкие удельные сопротивления, то есть без дополнительной обработки обладают высокой концентрацией основных носителей (10^{17} см$^{-3}$) за счет избытка кадмия [5].

В режиме освещения запираемого Au-νGaAs:O-перехода все приложенное напряжение падает в область объемного заряда под потенциальным барьером. Генерация фотоносителей будет осуществляться как из области объемного заряда, так и с примесных уровней кислорода, а также с уровней собственных дефектов. При этом также наблюдается переброс фотоносителей из металла в базу (рис. 4).

В случае прямого смещения Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры фотогенерация носителей осуществляется в арсениде галлия, где дырки скапливаются в яме валентной зоны, а также имеет место эмиссия фотоэлектронов из металла в полупроводник, как показано на энергетической зонной диаграмме (рис. 5).

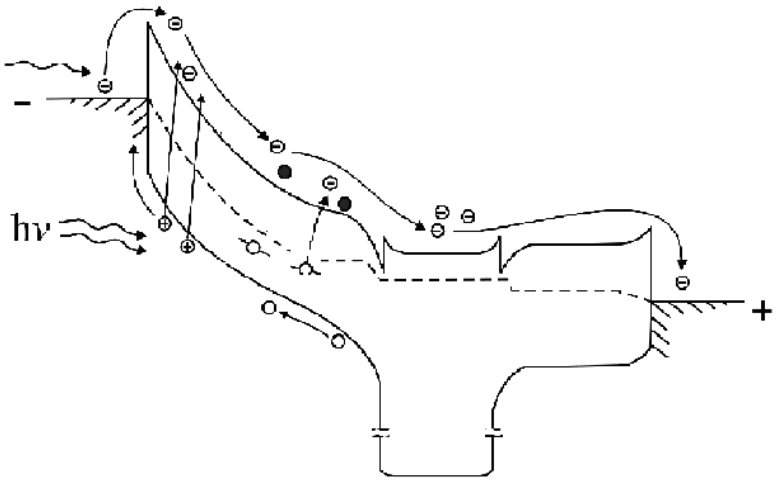


Рис. 4. Энергетическая зонная диаграмма Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры в режиме запирания Au-νGaAs-перехода.

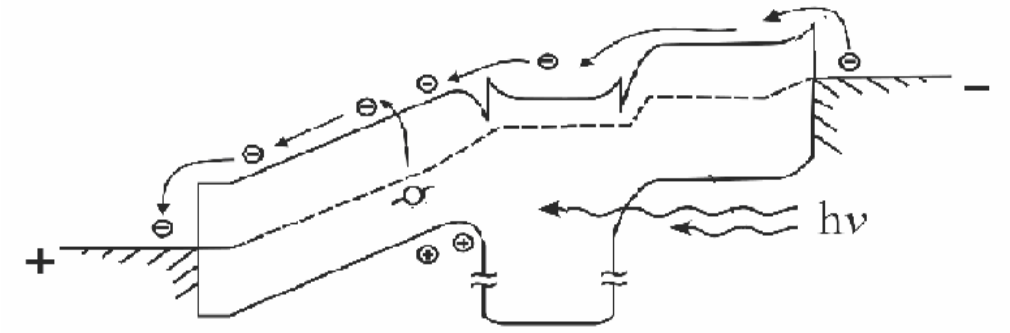


Рис. 5. Энергетическая зонная диаграмма Au-νGaAs:O-nCdS-nInP-Au структуры в режиме прямого смещения.

Заключение. Экспериментально показано, что на основе многослойной Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структуры с пленочными гетеослоями можно создать чувствительные в спектральном диапазоне 0.85–0.9 мкм и 1.31–1.55 мкм фотодиодные структуры, в которых слои сульфида кадмия и фосфида индия получены последовательным вакуумным напылением на подложку арсенида галлия, легированного кислородом, с удельным сопротивлением 1×10^7 Ом·см. Отличительной особенностью полученных фотодиодных Au-νGaAs:O-*n*CdS-*n*InP-Au структур является двусторонняя чувствительность и наличие эффекта усиления первичного фототока, особенно за счет эмиссии фотоносителей из металла в полупроводник. Также низкие значения темнового тока при комнатной температуре при сравнительно больших площадях ~3×4 мм^2 открывают возможность для их применения в оптических системах связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.А. Сысоев, М.Л. Лунина, Д.Л. Алфимова, А.В. Благин, Д.А. Гусев, Б.М. Середин, Журнал неорганические материалы **50**, №3, 1-7 (2014).
2. Д.Л. Алфимова, Л.С. Лунин, М.Л. Лунина и др., Кристаллография **62**, № 1, 137-142 (2017).
3. J.A. Michael, Appl. Physics **93**, 579–587 (2008).
4. Д.Л. Алфимова, Л.С. Лунин, М.Л. Лунина, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования № 6, 103-112 (2014).
5. Л.А. Косяченко, Х. Mathew, В.В. Мотущук, В.М. Склярчук, Физика и техника полупроводников **39**, Вып. 5, 569-572 (2005).
6. Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, А.Л. Андреев, Г.В. Польщиков. Источники и приемники излучения (Санкт-Петербург, Политехника, 1991).
7. Фотоприемники с внутренним усилением. http://rudocs.exdat.com/docs/index-529755.html?page=5
8. Д.Д. Гуламова, А.В. Каримов, Д.Г. Чигвинадзе, С.М. Ашимов, О.В. Маградзе, С.Х. Бобокулов, Ж.Ш. Турдиев, Х.Н. Бахронов**,** Журнал технической физики **89**, вып. 4, 583-589 (2019).
9. О.Т. Тимошенко. Новая многокомпонентная полупроводниковая система InP-CdS. Её поверхностные физико-химические свойства. Дис. канд. хим. наук (Омск, 2006); РГБ ОД, 61:07-2/130
10. A.V. Karimov, D.M. Yodgorova, O.A. Abdulkhaev. Physical Principles of Photocurrent Generation in Multi-Barrier Punch-Throungh-Structures. Chapter 2 of book “Photodiodes - World Activities in 2011”, ed. Jeong-Woo Park, InTech, 2011, 23-36 [ISBN: 9789533075].
11. С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, М.Д. Вилисова, И.А. Прудаев. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами. Под ред. О.П. Толбанова (Томск, Издательский Дом Томского государственного университета, 2016).