

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.09.034>

УДК 621.384.3

З.Ф. Цибрій

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ

E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

Особливості технології формування металічних контактів до дискретних ІЧ та ТГц приймачів випромінювання на основі епітаксійних шарів CdHgTe

Представлено членом-кореспондентом НАН України Ф.Ф. Сизовим

Наведено технологічні особливості формування двошарових металічних контактів до дискретних приймачів інфрачервоного та терагерцового діапазонів спектра, виготовлених на основі епітаксійних шарів CdHgTe, вирощених на підкладках CdZnTe методом рідкофазної епітаксії. Знайдено оптимальну комбінацію металів (адгезивний шар — струмопровідний шар), які створюють омичний контакт до р- та n-областей CdHgTe в процесі виготовлення дискретних детекторів за планарною технологією. Виміряні вольт-амперні характеристики контактів Mo—Au і Mo—In до епітаксійних шарів p-CdHgTe демонструють лінійний характер як при кімнатній температурі, так і при $T = 80$ К.

Ключові слова: кадмій—ртуть—телур, багатошаровий контакт, ІЧ та ТГц детектор.

Охолоджувані та неохолоджувані приймачі інфрачервоного (ІЧ) випромінювання в переважній більшості мають вже сформовані технології з добре визначеною архітектурою і їх застосування добре відоме. Проте, існують можливості для покращення спектрального діапазону, роздільної здатності, експлуатаційних характеристик, знижуючи при цьому ціну, розмір приладів, масу і потужність, а також для розширення використання ІЧ візуалізації для цілей подвійного призначення та комерційних застосувань. Одним із найважливіших факторів при виготовленні ІЧ детекторів є вихідний матеріал. На даний момент неперервний твердий розчин кадмій—ртуть—телур (CdHgTe, КРТ) залишається найперспективнішим напівпровідниковим матеріалом для виготовлення ІЧ детекторів [1–4], що обумовлено можливістю зміни краю фоточутливості шляхом зміни хімічного складу КРТ. Це дозволяє, наприклад, зменшити рівень шумів фотоприймача, оскільки ширина забороненої зони для діапазону фоточутливості може бути вибрана точно у відповідності до спектрального діапазону фотовідгуку. Останнім часом активно розвиваються технології ТГц приймачів $\nu \sim 0,1\text{--}10$ ТГц діапазону спектра [5]. Такі технології перспективні для астрономічних досліджень, у телекомунікаційних системах, для медичних застосувань, для візуалізації не-

безпечних чи прихованих предметів у системах безпеки тощо. У роботі [6] показано, що на основі епітаксійних шарів CdHgTe можуть бути створені двоспектральні неохолоджувані або слабоохолоджувані приймачі, що працюють як в ІЧ, так і у ТГц діапазонах спектра.

Робота пристроїв на основі CdHgTe визначається багатьма факторами, насамперед, якістю вихідного матеріалу та особливостями технологічних процесів їх виготовлення. Одним із критичних моментів при створенні КРТ детекторів є формування омичних контактів [7]. Багатоелементні фотовольгаїчні матриці є основою для технології виготовлення гібридних фотоприймальних пристроїв (ФПП) [2–4]. Найбільш широке застосування отримали матриці із $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,2-0,3$) для спектральних діапазонів 3–5 та 8–12 мкм. При виготовленні великоформатних ФПП використовуються технології гібридних з'єднань матриць фотоприймачів з кремнієвими схемами зчитування за допомогою холодного зварювання індієвих мікростовпчиків. Однак проблема створення омичних контактів до дискретних приймачів та матриць з невеликим числом елементів для ІЧ діапазону спектра, так само і формування металічних антен-контактів для ТГц приймачів на основі епітаксійних шарів CdHgTe залишається актуальною і недостатньо висвітлена у відкритій літературі. Формування омичних контактів до p - і n -областей КРТ при виготовленні, наприклад, ІЧ фотодіодних структур за планарною технологією в єдиному технологічному циклі є складною задачею. В даній роботі наведено оптимальну комбінацію металів та технологічні режими їх нанесення при виготовленні дискретних приймачів ІЧ та ТГц діапазону спектра на основі епітаксійних шарів CdHgTe, а також досліджені електричні характеристики контактів метал–КРТ.

Енергетична зонна структура CdHgTe характеризується наступними особливостями:

- 1) можливість задавати ширину забороненої зони при вирощуванні плівок з високою просторовою однорідністю і низькою густиною дислокацій ($<1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$) епітаксійними методами на узгоджених за сталою ґратки і прозорих в ІЧ діапазоні підкладках CdZnTe;
- 2) низька концентрація неосновних носіїв заряду ($<1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$);
- 3) відомі відповідні легуючі домішки для створення n - і p -типу провідності;
- 4) універсальні методи для формування мезаструктур і планарних гомо- та гетеропереходів;
- 5) можливість використання CdTe як пасиваційного покриття, що сприяє реалізації фотодіодів з низьким значенням $1/f$ шуму і з високою радіаційною стійкістю [8].

Така комбінація зонної структури і властивостей матеріалу робить можливим одержання якісних ІЧ детекторів, включаючи фотоопори, одно- та мультиспектральні фотодіоди, фотодіодні матриці, з робочими характеристиками близькими до теоретично можливих і змінювати граничну довжину хвилі у спектральному діапазоні 1,5–20 мкм. У даній роботі дискретні фотодіодні приймачі середньохвильового ІЧ діапазону ($\lambda \sim 3 \div 5$ мкм) та приймачі ТГц діапазону формувались на основі епітаксійних шарів $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \approx 0,3$), вирощених методом рідкофазної епітаксії на підкладках $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($y \approx 0,04$) за планарною технологією з використанням фотолітографічних процесів.

Формування низькоомного електричного контакту до напівпровідника з низьким рівнем шумів є дуже важливим фактором, що визначає порогові характеристики фотоприймача. Очевидно, що величина питомого опору контакту метал–КРТ залежить як від величини вмісту кадмію (x) у складі $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, так і від типу провідності матеріалу: n -, чи

p-тип. Чим більше значення x , тим більшою є величина потенціального бар'єру на контакті, і тим вищим буде його питомий опір. Формування омичного контакту до матеріалу *p*-типу провідності є складнішою задачею, ніж до *n*-типу. Інтерфейсний бар'єр у КРТ *p*-типу значно товстіший, ніж у *n*-типу і діркам, які є основними носіями заряду і мають значно більшу ефективну масу та нижчу рухливість порівняно з електронами, важче протунелювати через цей бар'єр. Нанесення металу на поверхню спричиняє вигин зон в поверхневому шарі КРТ. Атоми металу, які при напилюванні мають енергію порядку декількох еВ, дифундують в CdHgTe і створюють локальні домішкові рівні. При цьому відбувається розпад КРТ в поверхневому шарі, в першу чергу HgTe, дифузія металу в об'єм і зворотна дифузія компонентів у металічний шар, що наноситься. Метал хімічно взаємодіє з компонентами напівпровідника — найбільш активно з телуром, утворюючи телуриди. В табл. 1 наведено термодинамічні властивості інтерфейсів деяких металів з КРТ. “Вільна” ртуть легко дифундує і накопичується, зазвичай, на межі КРТ з металом, а “вільний” телур утворює плівку на поверхні шару металу, що наноситься.

Розглянемо детальніше властивості деяких металів до КРТ. Переважаючим механізмом росту шарів золота на поверхні КРТ є кластерний механізм. Атоми золота мають великий коефіцієнт дифузії, проникають в глибину кристала і створюють там донорні рівні, легуючи матеріал *p*-типу провідності. Ртуть легко дифундує до поверхні і частково випаровується, а телур накопичується біля поверхні і дифундує в шар металу, внаслідок чого у золоті утворюються ниткоподібні включення телуру [8, 9]. Слід відзначити, що золото має низьку адгезію до епітаксійних шарів КРТ.

Індій широко застосовують для формування низькоомних контактів до КРТ *n*-типу провідності. Плівки індію при напилюванні ростуть пошарово. При цьому ртуть дифундує із поверхневого шару КРТ майже повністю, а при формуванні товстіших (понад десятки нм) металічних плівок вільний телур накопичується безпосередньо на межі In/CdHgTe і частково дифундує в шар металу. Атоми ж індію дифундують в КРТ і створюють там донорні n^+ рівні.

Алюміній сильно руйнує поверхню КРТ. При нанесенні всього 0,5–0,7 молекулярних шарів у перехідній області виникає практично повністю збіднений ртуттю шар товщиною 1–2 нм. Алюміній активно взаємодіє з телуром з утворенням в перехідній області Al_2Te_3 . Телур спостерігається на зворотній стороні алюмінію.

При напилюванні титану відбувається інтенсивне випаровування ртуті — після нанесення всього 0,1 нм в поверхневому шарі КРТ залишається близько 5 % ртуті.

Осадження хрому хімічно пасивує поверхню КРТ і не спостерігається вихідна дифузія Te та втрати Hg на інтерфейсі.

У даній роботі відпрацьовувалась технологія нанесення плівок металів Ni, Ti, Mo, Cr, In, Au на поверхню епітаксійних шарів КРТ для отримання омичного контакту з високою адгезією для подальшого формування електричних контактних виводів. Контакт метал — напівпровідник — багатшарова структура, стабільність контакту визначається сформованим перехідним шаром, властивості якого, як зазначалось вище, залежать від властивостей металу і способів його нанесення. Осадження плівок металів Ni, Ti, Mo, Cr здійснювалось у вакуумній установці ВУП-5М методом магнетронного розпилювання. Вихідний вакуум в робочій камері установки дорівнював $4 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. Магнетронна розпилювальна сис-

тема має плоску дискову мішень діаметром 40 мм, розміщення підкладки на відстані 30 мм від джерела, напруга живлення 500 В, густина струму на мішень 200 мА/см², питома потужність 100 Вт/см². Робочий тиск у камері становив 0,5 Па, індукція магнітного поля — 0,08 Тл. Перевагами магнетронної розпилювальної системи є те, що захоплення вторинних електронів магнітною ловушкою біля поверхні мішені запобігає інтенсивному перегріву підкладки, що в свою чергу дозволяє збільшити швидкість розпилювання металів і отже їх осадження. Запобігання перегріву структур на основі КРТ є однією з основних вимог при роботі з даним матеріалом. Разом з достоїнствами, метод магнетронного розпилювання має недоліки, одним з яких є труднощі відтворення режиму горіння розряду при переході до мішені з іншого матеріалу (оскільки змінюється коефіцієнт вторинної електронно-іонної емісії). Тому, змінюючи потужність розряду для кожного металу підбиралися режими, при яких формувалися плівки, однорідні за товщиною і з високою адгезією до підкладки.

Для формування металічних контактів до ІЧ фотодіодних структур та антен-контактів до приймачів ТГц діапазону спектра на основі епітаксійних шарів CdHgTe у роботі була використана багатошарова металізація. При виборі металів слід враховувати відповідність коефіцієнтів теплового розширення КРТ та металу та їх зміну з температурою, оскільки приймачі на основі епітаксійних шарів CdHgTe зазнають як підвищеного температурного впливу (до 400 К) в процесі технологічних операцій їх виготовлення, так і впливу низьких робочих температур (до 77 К). Невідповідність у коефіцієнтах теплового розширення (КТР) різних шарів детектора може призвести до термічних деформацій і як результат до деградації його параметрів. Лінійний КТР неперервного твердого розчину Cd_xHg_{1-x}Te при кімнатній температурі слабо залежить від хімічного складу x і варіює в межах $(5 \div 5,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [8]. Значно сильнішою є зміна лінійного КТР CdHgTe при зменшенні температури нижче 250 К. Значення КТР CdHgTe при робочій температурі ІЧ фотодіодів 77 К складає $(0,1 \div 2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,

Таблиця 1. Термодинамічні властивості інтерфейсу метал/КРТ [8, 9].

H_f — теплота утворення сполуки на поверхні, H_{sol} — теплота утворення сполуки в об'ємі

Метал (М)	Телурид	H_f (телурид), Ккал/моль	H_{sol} (Cd; М), Ккал/моль	H_{sol} (Hg; М), Ккал/моль
Cd	CdTe	-24,1	—	—
Hg	HgTe	-7,6	—	—
Au	AuTe ₂	-4,5	-12,2	-6,4
In	In ₂ Te ₃	-45,8	+0,4	-0,8
Cr	Cr ₂ Te ₃	-30,1	—	—
Al	Al ₂ Te ₃	-76,2	+3,6	+4,1
Ti	TiTe	-28,9	—	—

Таблиця 2. Значення лінійного КТР деяких металів в температурному діапазоні 20 ÷ 100 °С [10]

Метал	Cr	Ti	Mo	Ni	Au	In
КТР · 10 ⁻⁶ , К ⁻¹	4,9–8,2	8,4–8,6	4,8–5,1	13	14	20–33

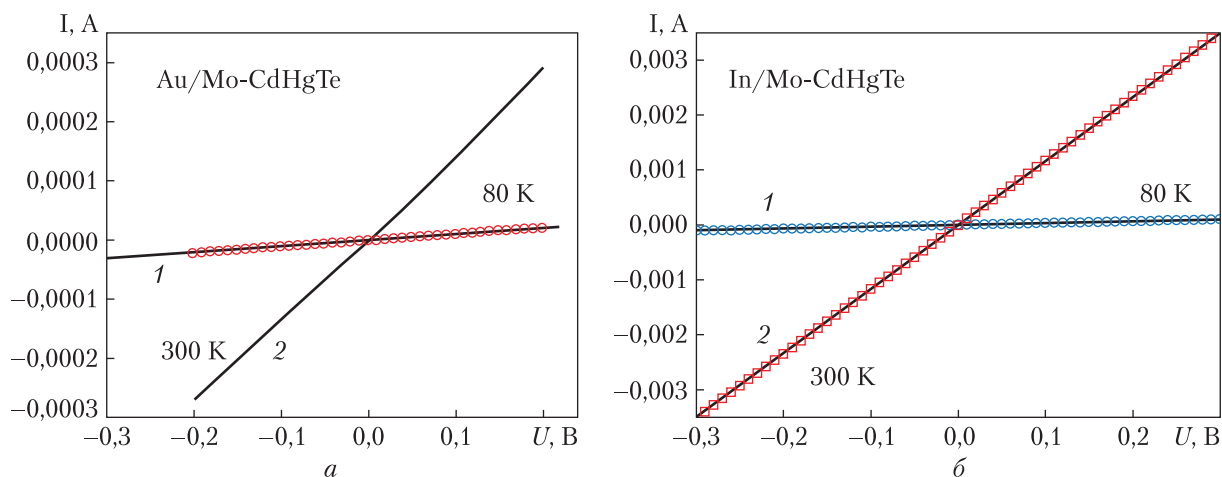


Рис. 1. ВАХ контактів Au/Мо (а) та In/Мо (б) до епітаксійних плівок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \approx 0,3$) при температурі $T = 80$ К (залежності 1) та при кімнатній температурі (залежності 2). Вимірювання проводили мікрозондовим методом (суцільні лінії) та з використанням припаяних мікроконтактів (символи)

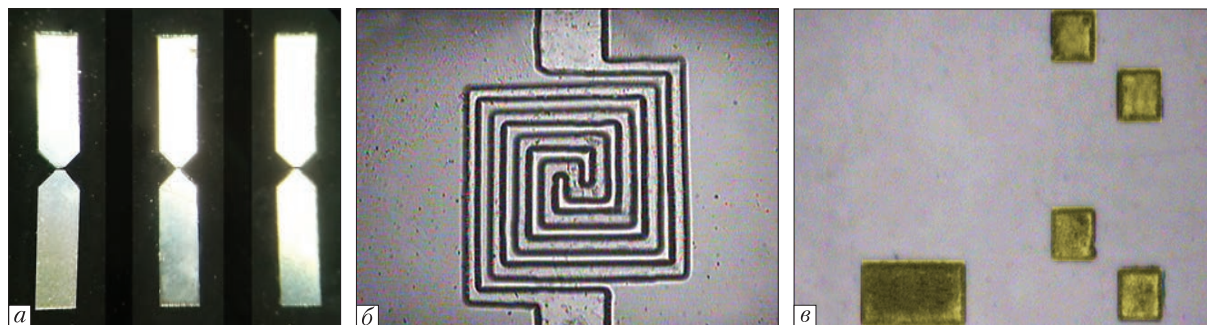


Рис. 2. Мікрофотографії металічних Mo-In антен-контактів виготовлених приймачів ТГц випромінювання (а і б) та Mo—Au контактів до ІЧ фотодіодних структур (в) на основі епітаксійних шарів CdHgTe

а при температурі нижче 60 К лінійний КТР набуває від'ємних значень і досягає мінімуму при 20 К [8]. У табл. 2 наведені значення лінійного КТР досліджуваних нами металів [10]. Як видно із табл. 2, найбільш близькі значення КТР до CdHgTe при кімнатній температурі мають молібден і хром.

Багатошаровий металічний контакт являє собою сендвіч, що складається із контактного (або адгезивного Mo, Cr, Ti) шару та основного струмопровідного, яким слугують індій чи золото. Ці метали наносили методом термічного розпилювання у вакуумі в установці ВУП-5 з безмасляним відкачуванням робочої камери при робочому тиску $3 \cdot 10^{-5}$ Па. При напилюванні плівки індію використовувався випаровувач з танталової фольги товщиною 0,02 мм. Робочий струм становив 25 А. При напилюванні золотої плівки використовували випаровувач з молібденової фольги товщиною 0,02 мм. Робочий струм при цьому складав 45 А. Шари золота та індію наносили як на холодну підкладку з метою уникнення термічного впливу на структуру, так із нагріванням до $T = 100$ °С для покращення адгезії.

На рис. 1 наведені вольт-амперні характеристики (ВАХ) контактів Au/Мо та In/Мо до епітаксійних плівок p -CdHgTe при температурі $T = 80$ К (залежності 1) та при кімнатній

температурі (залежності 2). Вказаний температурний діапазон є робочим для охолоджуваних приймачів ІЧ діапазону та неохолоджуваних або слабоохолоджуваних приймачів ТГц діапазону спектра, виготовлених на основі епітаксійних шарів КРТ. Як видно з рис. 1, така комбінація металів демонструє лінійний характер ВАХ, що свідчить про омичність контактів. Експериментально встановлено, що найкращим адгезивним металом під золото та індію є молібден. Спочатку ВАХ вимірювали мікросондовим методом на сформованих металевих площадках (суцільні лінії на рис. 1, а і б). Далі проводили технологічну операцію формування електричних контактів методом припаювання золотих мікродротів. Повторне вимірювання ВАХ показало, що дана технологічна операція не вносить деструктивного впливу на якість контактів (символи на рис. 1, а і б).

Товщину металевих плівок та їх однорідність по площі досліджували за допомогою безконтактного інтерференційного профілометра “Мікрон-Альфа”. У залежності від технологічних режимів вирощування металічних плівок товщина адгезивних шарів молібдену становила 40–50 нм, а товщина шарів золота чи індію була порядку 1 мкм.

Методом енергодисперсійного рентгенівського аналізу було підтверджено описану вище інтедифузю складових компонент неперервного твердого розчину CdHgTe у приконтактній області КРТ–молібден. Зокрема, було виявлено ~11 % Te, ~6 % Hg, а також достатньо високий вміст кисню, який ймовірно дуже швидко адсорбується після травлення поверхні КРТ у бромвмісному травнику в технологічному процесі виготовлення детекторів на основі КРТ.

На рис. 2 показані мікрофотографії фрагментів металічних Mo-In антен-контактів виготовлених приймачів ТГц випромінювання з різною топологією на основі епітаксійних шарів КРТ (рис. 2, а і б) та Mo-Au контактів до ІЧ фотодіодних структур на основі епітаксійних шарів КРТ (рис. 2, в).

Застосування інших комбінацій металів призводило або до поганої їх адгезії до епітаксійних шарів КРТ при низькотемпературних режимах вирощування, чи до нелінійності ВАХ. Встановлено, що контакти Mo-In та Mo-Au є оптимальними при формуванні дискретних КРТ приймачів ІЧ та ТГц діапазонів спектра за планарною технологією.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Kinch M.A. State-of-the-Art Infrared Detector Technology. Bellingham: SPIE Press, 2014. 280 p.
2. Сизов Ф.Ф. Фотоелектроніка для систем видення. Київ: Академперіодика, 2008.
3. Antoni Rogalski. Infrared and Terahertz Detectors. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. 127 p.
4. MCT's Advantages as an Infrared Imaging Material. http://www.leonardodrs.com/media/4279/201306_advantages_of_mct.pdf
5. Sizov F. Terahertz detectors: State of the art. *Semicon. Sci. Technol.* 2018. **33**, 123001. 26 p. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aae473>
6. Sizov F, Zabudsky V., Dvoretiskii S., Petryakov V., Golenkov O., Andreyeva K., Tsybrii Z. Two-color detector: Mercury-Cadmium-Telluride as a terahertz and infrared detector. *Appl. Phys. Lett.* 2015. **106**, P. 082104–1–182104-4. <https://doi.org/10.1063/1.4913590>
7. Dan Liu, Chun Lin, Songmin Zhou, and Xiaoning Hu. Ohmic Contact of Au/Mo on $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *J. Electr. Mater.* 2016. **45**, № 6. P. 2802–2807. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4375-y>
8. Peter Capper, James Garland. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. Wiley, 2011.
9. Стафеев В.И. Структура и свойства контактов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -металл. *ФТП*. 2009. **43**, № 5. С. 636–639.
10. https://ctherm.com/resources/blog/summary_of_coefficient_of_linear_expansion_cte/

Поступило в редакцію 05.06.2019

REFERENCES

1. Kinch, M. A. (2014). State-of-the-Art Infrared Detector Technology. Bellingham: SPIE Press.
2. Sizov, F. F. (2008). Photoelectronics for imaging systems. Kyiv: Akademperiodyka (in Russian).
3. Antoni, Rogalski. (2019). Infrared and Terahertz Detectors. CRC Press, Taylor & Francis Group.
4. MCT's Advantages as an Infrared Imaging Material. http://www.leonardodr.com/media/4279/201306_advantages_of_mct.pdf
5. Sizov, F. (2018). Terahertz detectors: State of the art. *Semicon. Sci. Technol.*, 33, 123001 (26 pp.). <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aae473>
6. Sizov, F., Zabudsky, V., Dvoretiskii, S., Petryakov, V., Golenkov, O., Andreyeva, K. & Tsybrii, Z. (2015). Two-color detector: Mercury-Cadmium-Telluride as a terahertz and infrared detector. *Appl. Phys. Lett.*, 106, pp. 082104-1-182104-4. <https://doi.org/10.1063/1.4913590>
7. Dan, Liu, Chun, Lin, Songmin, Zhou & Xiaoning, Hu. (2016). Ohmic Contact of Au/Mo on $Hg_{1-x}Cd_xTe$. *J. Electr. Mater.*, 45, No. 6, pp. 2802-2807. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4375-y>
8. Capper, Peter & Garland, James. (2011). Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. Wiley and Sons.
9. Stafeev, V. I. (2009). Structure and Properties of $Cd_xHg_{1-x}Te$ -Metal Contacts. *FTP*, 43, No. 5, pp. 636-639 (in Russian).
10. https://ctherm.com/resources/blog/summary_of_coefficient_of_linear_expansion_cte/

Received 05.06.2019

3.Ф. Цибриї

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев
E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К ДИСКРЕТНЫМ ИК И ТГц ПРИЕМНИКАМ
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ CdHgTe

Приведены технологические особенности формирования двуслойных металлических контактов к дискретным приемникам инфракрасного и терагерцового диапазонов спектра, изготовленных на основе эпитаксиальных слоев CdHgTe, выращенных на подложках CdZnTe методом жидкофазной эпитаксии. Найдено оптимальную комбинацию металлов (адгезивный слой — токопроводящий слой), которые создают омический контакт к *p*- и *n*-областям CdHgTe в процессе изготовления дискретных детекторов по планарной технологии. Измеренные вольт-амперные характеристики контактов Mo—Au и Mo—In к эпитаксиальным слоям *p*-CdHgTe демонстрируют линейный характер как при комнатной температуре, так и при $T = 80$ К.

Ключевые слова: кадмий—ртуть—теллур, многослойный контакт, ИК и ТГц детектор.

Z.F. Tsybrii

V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv
E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF FORMATION OF METAL CONTACTS TO DISCRETE IR
AND THz RADIATION DETECTORS BASED ON CdHgTe EPITAXIAL LAYERS

The technological features of the formation of two-layer metal contacts to discrete detectors for the infrared and terahertz spectral bands made on the basis of epitaxial layers of CdHgTe grown on CdZnTe substrates by the liquid phase epitaxy method are given. The optimal combination of metals (adhesive layer — conductive layer), which creates an ohmic contact to the *p*- and *n*-types of CdHgTe in the process of discrete detectors manufacturing by the planar technology is found. Measured current-voltage characteristics of the Mo—Au and Mo—In contacts to the epitaxial layers of *p*-CdHgTe show a linear behavior both at room temperature and at $T = 80$ K.

Keywords: cadmium—mercury—telluride, multilayered contact, IR and THz detectors.