

УДК 621.315.592

Д. т. н. Н. М. ВАКИВ, д. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ, к. ф-м. н. А. В. СУКАЧ¹,
д. ф-м. н. В. В. ТЕТЬОРКИН¹, к. т. н. И. А. МРЫХИН, Ю. С. МИХАЩУК, Р. С. КРУКОВСКИЙ

Украина, г. Львов, НПП “Карат”; г. Киев, ¹ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАНУ

E-mail: carat207@i.ua

СВОЙСТВА ДВОЙНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Получены эпитаксиальные гетероструктуры p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, в которых металлургическая граница совпадает с электрической. Это достигается выращиванием дополнительного буферного слоя n -InP и уменьшением времени выращивания эмиттерного p^+ -InP-слоя, сильно легированного Zn. Спектры электролюминесценции таких структур имеют меньшую полуширину и более высокую мощность ИК-излучения, чем те, в которых формируется p - n -переход в InGaAsP-слое. Гетероструктуры предназначены для создания эффективных ИК-светодиодов с длиной волны в максимуме спектра 1,06 мкм.

Ключевые слова: эпитаксиальные гетероструктуры, жидкофазная эпитаксия, легирование, электролюминесценция, фоточувствительность.

Двойные гетеропереходы (ДГП) p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP применяются в инфракрасной (ИК) оптоэлектронике для изготовления на их основе инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов в спектральном диапазоне 1,0–1,7 мкм [1–4]. Наибольший интерес для прикладных разработок представляют длины волн 1,06; 1,3 и 1,6 мкм, на которых оптические потери сигнала в кварцевом волокне незначительны, что позволяет построить трехканальную линию связи на основе одного волоконно-оптического кабеля [4]. Одним из преимуществ гетеропереходов InP/InGaAsP является возможность изменения ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ от 0,73 до 1,35 эВ при достаточно хорошем согласовании параметров кристаллических решеток контактирующих материалов (относительное расхождение не более 0,1%) [5]. ДГП p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP представляют интерес также для разработчиков элементной базы ИК-оптоэлектроники, а именно сенсоров физических величин на основе волоконно-оптических датчиков [4].

Несмотря на существенный прогресс в технологии выращивания ДГП p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP и разработке приборов на их основе, по-прежнему актуальными остаются проблемы воспроизводимости состава и электрофизических параметров активной InGaAsP-области, уменьшения влияния фоновых примесей на концентрацию основных носителей заряда в ней, выяснения механизмов деградации и природы избыточных токов [6–10].

Важной технологической проблемой при выращивании структур InP/InGaAsP является неконтролируемое легирование цинком гетерограницы со стороны слоя n -InGaAsP при выращи-

вании верхнего эмиттерного p^+ -InP-слоя методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Такое легирование приводит к формированию p - n -перехода в активной InGaAsP-области, обуславливает дополнительные оптические потери ИК-излучения в p -слое, сдвиг максимума спектра электролюминесценции в более длинноволновую область с длиной волны $\lambda_{\text{max}}=1,08$ мкм вместо ожидаемой $\lambda_{\text{max}}=1,06$ мкм. Такая длина волны электролюминесценции соответствует соединению InGaAsP с шириной запрещенной зоны $E_g=1,17$ эВ при температуре $T=300$ К. Кроме того, легирование гетерограницы InP/InGaAsP цинком обуславливает формирование на границе p - n -перехода в InGaAsP компенсированной области, вследствие чего значение последовательного сопротивления ДГП возрастает почти на порядок по сравнению с ожидаемым расчетным [11].

Целью настоящего исследования было совершенствование технологии выращивания ДГП p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP методом ЖФЭ, предназначенной для изготовления на ее основе ИК-светодиодов с $\lambda_{\text{max}}=1,06$ мкм, в которых металлургическая гетерограница совпадала бы с электрической.

Образцы и методика эксперимента

Эпитаксиальные слои InP и InGaAsP такого состава, которому соответствует $E_g=1,17$ эВ ($T=300$ К), выращивались методом ЖФЭ в графитовой слайдерной кассете из расплава индия чистотой 99,9999 на подложках n^+ -InP с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³ и кристаллографической ориентацией рабочей поверхности (100). Конечная толщина подложки после соответствующих предэпитаксиальных обработок составила 350–380 мкм. Температура начала

эпитаксии для слоев InP равна 680°C, а для слоев InGaAsP — 650°C. Кристаллизация слоев осуществлялась из переохлажденного раствора-расплава при скорости охлаждения 0,8°C/мин. Необходимые для очистки слоев от фоновых примесей элементы — алюминий и иттербий — добавлялись в шихту перед загрузкой в кассету по методике, предложенной в [7]. Расплавы насыщались фосфором с использованием поликристаллического InP с концентрацией электронов $(5-7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($T=300 \text{ K}$). Гомогенизация раствора-расплава происходила на протяжении 1,5–2,0 ч в атмосфере очищенного через палладиевый барьер водорода с точкой росы –70°C. Непосредственно перед началом наращивания слоя *n*-InP поверхность подложки подрастворялась в недонасыщенном фосфором расплаве индия. Толщина автоэпитаксиальных слоев составляла 5–7 мкм, концентрация электронов $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, их подвижность около $1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T=300 \text{ K}$. На буферном автоэпитаксиальном InP-слое выращивался слой соединения *n*-InGaAsP ($E_g=1,17 \text{ эВ}$) с концентрацией электронов $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 3–4 мкм. В отличие от использовавшейся ранее [11] технологии изготовления (далее **ТИ1**) ДПП p^+ -InP/*n*-InGaAsP/*n*-InP, в настоящей работе использовалась измененная технология (**ТИ2**). С целью уменьшения легирования цинком *n*-InGaAsP-области из слоя p^+ -InP:Zn, дополнительно формировался буферный слой *n*-InP толщиной около 1,5 мкм с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, время наращивания эмитерного p^+ -InP слоя было уменьшено с 25 до 10 мин, при этом его толщина составляла 1,5 мкм, а концентрация дырок в нем — $(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В качестве омического контакта к p^+ -InP использовался сплав In–Zn с содержанием цинка 3%, а к *n*-InP — чистый индий. Контактные площадки наносились термовакуумным методом с последующей термообработкой в атмосфере очищенного водорода при температуре около 400°C в течение 3–5 мин. Технология изготовления омического контакта в InP отрабатывалась предварительно на образцах *n*- и *p*-типа проводимости. Для изготовления мезоструктур использовался травитель, состоящий из соляной и уксусной кислот и перекиси водорода в соотношении 1:2:1. Средняя активная площадь исследуемых образцов составляла $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, диаметр верхнего контакта 0,2 мм, а нижний покрывал всю поверхность. ИК-излучение выводилось из активной области структуры сквозь слой *p*-InP.

Темновые вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) измерялись при постоянном токе при температуре 295 К. Распределение основных носителей заряда на гетерогранице исследовалось на основе измеренных на частоте 1 МГц вольт-фарадных характеристик (**ВФХ**). Спектральное распределение ампер-ваттной чувствительности образцов измерялось при токе короткого замы-

кания, а ватт-амперные характеристики ИК-светодиодов — при постоянном токе, причем в качестве приемника ИК-излучения использовался калиброванный германиевый фотодиод.

Результаты эксперимента

Распределение основных носителей заряда на границе потенциального барьера определялось на основе высокочастотных (1 МГц) ВФХ при $T = 295 \text{ K}$ (рис. 1, а). Результаты эксперимента линеаризировались в координатах $C^{-2}-U$ для обратных напряжений смещения $0 < U \leq 1,5 \text{ В}$, причем емкостное напряжение отсечки составляло $U_C=1,3-1,8 \text{ В}$, что превышало ширину запрещенной зоны соединения InGaAsP ($E_g=1,17 \text{ эВ}$) при $T = 300 \text{ K}$ [12]. Большие значения U_C могут определяться влиянием как последовательного сопротивления, так и глубоких центров, локализованных в области пространственного заряда гетероструктуры [12, 13]. Последовательное сопротивление в исследованных структурах растет вследствие формирования компенсированного слоя на границе ДПП, на что указывают ВФХ гетеропереходов. Во-первых, при прямых смещениях ($U \geq 1,0 \text{ В}$) наблюдается тенденция зависимости $C^{-2}=f(U)$ к насыщению. Кроме того, по наклону линейного участка графика этой зависимости была проведена оценка эффективной концентрации основных носителей заряда в квазинейтральной области. Полученное значение $(2-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ оказалось на порядок меньше концентрации носителей заряда в *n*-InGaAsP-слое.

Типичная ВАХ ДПП показана на рис. 1, б. Как видно из рисунка, прямая ветвь удовлетворительно линеаризируется в координатах

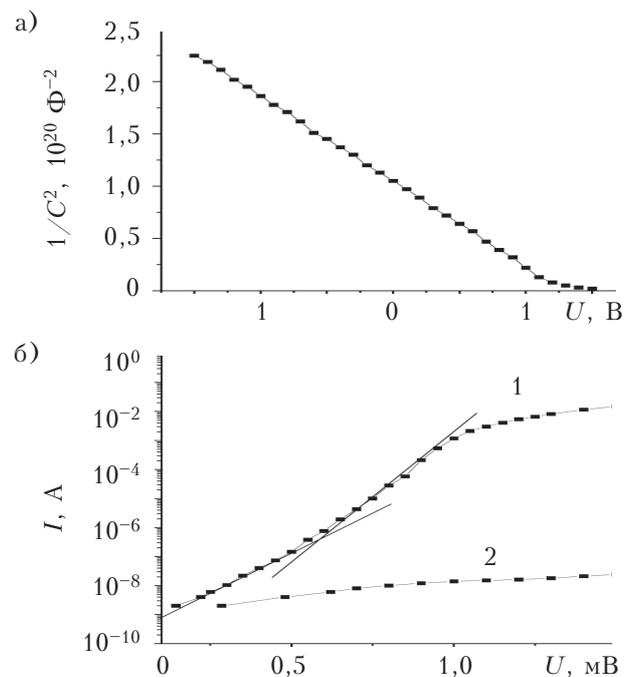


Рис. 1. ВФХ (а) и ВАХ (б) ДПП, изготовленного по ТИ2, при комнатной температуре

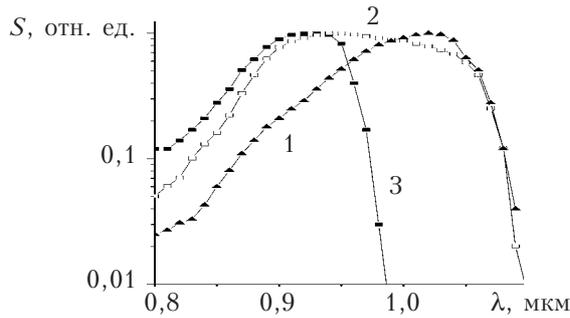


Рис. 2. Спектральное распределение чувствительности ДПП, изготовленных по ТИ1 (1), ТИ2 (2), а также $p-n$ -перехода InP (3)

$\lg I - U$ в диапазоне напряжений $0,25 \leq U \leq 1,0$ В. При этом наличие на графике двух участков с различными углами наклона свидетельствует о возможной реализации различных механизмов прохождения тока. При более высоких напряжениях прямого смещения ВАХ определяется последовательным сопротивлением R_s . В исследованных ДПП оно составило около 7 Ом. Экспериментальные ВАХ удовлетворительно аппроксимируются выражением

$$I = I_{01} \exp(eU / E_0) + I_{02} \left(\frac{eU - IR_s}{\beta kT} \right), \quad (1)$$

где $I_{01} = 8 \cdot 10^{-10}$ А; $I_{02} = 5 \cdot 10^{-12}$ А;
 E_0 — характеристическая энергия, $E_0 = 73$ мэВ;
 β — коэффициент неидеальности, $\beta = 2,0$.

Первая составляющая в этом выражении описывает туннельный ток, а вторая — генерационно-рекомбинационный. Максимальные значения коэффициента выпрямления составляли $(0,5 - 1,0) \cdot 10^6$ при $U = 1,5$ В. Шунтирующее сопротивление, которое определялось по дифференциальному сопротивлению обратной ветви ВАХ при напряжении смещения 2 В, изменялось в пределах $(0,7 - 1,5) \cdot 10^7$ Ом.

На рис. 2 приведено спектральное распределение фоточувствительности S (ФЧ) ДПП, изготовленных по традиционной (ТИ1) и предлагаемой (ТИ2) технологиям, при их освещении со стороны p^+-InP слоя. Важно отметить, что во всех структурах на слое p^+-InP генерировался положительный сигнал фотоответа, что вместе с отсутствием изменения полярности фотоответа в ДПП свидетельствует о его формировании исключительно одним потенциальным барьером во всех исследованных структурах. В ДПП, изготовленных по ТИ2, этот барьер возникает на гетерогранице $p^+-InP/n-InGaAsP$, причем спектральная зависимость фотоответа характерна для гетеропереходов, в которых наблюдается эффект «широкозонного окна» [14, 15]. В то же время, в ДПП, изготовленном по ТИ1, фотоответ определяется $p-n$ -переходом в слое $n-InGaAsP$, что объясняет его более селективный характер по сравнению с ДПП, изготовленным по ТИ2. Совпадение длинноволновой границы спектров ФЧ

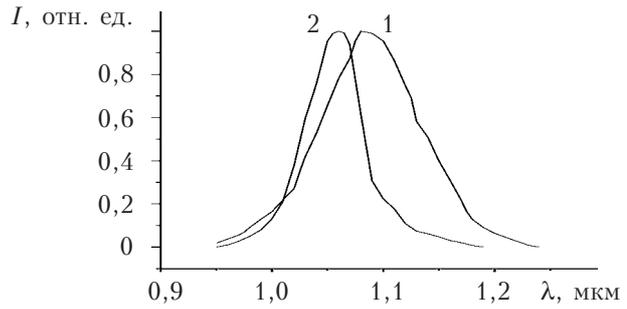


Рис. 3. Спектры электролюминесценции ДПП, изготовленных по ТИ1 (1) и ТИ2 (2), при комнатной температуре

в обоих ДПП свидетельствует о локализации активной области в слое $InGaAsP$. Очевидно, коротковолновая граница в ДПП, изготовленном по ТИ2, определяется оптической генерацией носителей в p -слое InP , который образовался в результате диффузии цинка из p^+ -слоя в буферный слой n -типа с образованием структуры $p^+-p-InP$. Это подтверждается проведенными исследованиями, которые показали, что сильно легированный слой p^+-InP не является фоточувствительным. В случае сильного легирования p -слоя коротковолновая граница ФЧ была бы сдвинута в область больших значений длины волны (около 0,92 мкм). К тому же, относительно широкий спектр ФЧ в $InP-p-n$ -переходах можно объяснить только формированием на границе перехода компенсированной области. Ее наличие было подтверждено измеренной ВФХ. Эффективная концентрация носителей в этой области составила $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Спектры электролюминесценции ДПП приведены на рис. 3. Плотность постоянного тока составляла $14,1 \text{ А/см}^2$, мощность излучения — 0,37 и 0,85 мВт для структур, изготовленных по ТИ1 и ТИ2 соответственно. Спектр для ДПП, изготовленного по ТИ2, сдвинут в коротковолновую область ($\lambda_{\text{max}} = 1,06 \text{ мкм}$), характеризуется меньшей полушириной (около 60 мэВ) и имеет более симметричный характер по сравнению со спектром ДПП, изготовленного по ТИ1. Эти результаты объясняются участием в электролюминесценции «хвостов» плотности состояний в компенсированной области. В ДПП, изготовленном по ТИ1, степень компенсации выше, результатом чего является большая полуширина спектра (около 80 мэВ). Смещение максимума спектра в длинноволновую область при этом обусловлено формированием $p-n$ -перехода в слое $InGaAsP$ и оптическими потерями в этом слое.

Заключение

Усовершенствование технологии выращивания двойных гетеропереходов $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$ позволило получить структуры, у которых гетерограница совпадает с электрической. Это достигается выращиванием дополнительного буферного слоя $n-InP$ и уменьшением времени выращивания эмиттерного p^+-InP -слоя, сильно ле-

гированного цинком. Спектры электролюминесценции таких структур имеют меньшую полуширину по сравнению со структурами, в которых формируется $p-n$ -переход в InGaAsP-слое, а также более высокую мощность ИК-излучения.

Изготовленные структуры могут использоваться для создания эффективных ИК-светодиодов с $\lambda_{\max}=1,06$ мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. — Москва: Физматлит, 2008. [Shubert F. E. Svetodiody. Moscow: Fizmatlit, 2008]
2. Лешко А. Ю., Лютецкий А. В., Пихтин Н. А. и др. Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур ($\lambda=1,3-1,6$ мкм) // ФТП. — 2002. — Т. 36, № 11. — С. 1393–1399. [Leshko A. Yu., Lyutetskii A. V., Pikhtin N. A. i dr. // FTP. 2002. Vol. 36, N 11. P. 1393]
3. Лютецкий А. В., Пихтин Н. А., Фетисова Н. В. и др. Мощные диодные лазеры ($\lambda=1,7-1,8$ мкм) на основе асимметричных квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур раздельного ограничения // ФТП. — 2009. — Т. 43, № 12. — С. 1646–1649. [Lyutetskii A. V., Pikhtin N. A., Fetisova N. V. i dr. // FTP. 2009. Vol. 43, N 12. P. 1646]
4. Окоши Т., Окамото К., Оцу М. и др. Волоконно-оптические датчики. — Ленинград: Наука, 1990. [Okosi T., Okamoto K., Otsu M. i dr. Volokonno-opticheskie datchiki. Leningrad: Nauka, 1990]
5. Ангина Н. Р., Арбенина В. В., Малинина Т. М. Четырехкомпонентные твердые растворы в системе In-Ga-As-P — новый материал электронной техники // Зарубежная электронная техника. — 1983, № 8 (266). — С. 3–82. [Angina N. R., Arbenina V. V., Malinina T. M. // Zarubezhnaya elektronnaia tekhnika. 1983, Vol. 8 (266). P. 3]
6. Васильев Н. Г., Васильев А. М., Вилис Д. М. и др. Получение гетероструктур InP/InGaAsP/InP методом жидкофазной эпитаксии и раздельное приготовление растворов-расплавов // Изв. РАН. Неорган. матер. — 2007. — Т. 43, № 7. — С. 775–780. [Vasil'ev N. G., Vasil'ev A. M., Vilis D. M. i dr. // Izv. RAN. Neorgan. mater. 2007. Vol. 43, N 7. P. 775]
7. Круковский С. И. Комплексно-легированные эпитаксиальные структуры InP/InGaAsP для оптоэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 2. — С. 27–31. [Krukovskii S. I. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2006. N 2. P. 27]
8. Prochazkova O., Oswald J., Zavadil J. et al. Characterization of InP and GaInAsP layers prepared by liquid-phase epitaxy using holmium doping and gettering // Material Science and Engineering, (B). — 1997. — Vol. 44, N 2. — P. 160–163.
9. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии A^3B^5 и приборов на их основе // ФТП. — 2003. — Т. 37, № 8. — С. 922–940. [Gorelenok A. T., Kamanin A. V., Shmidt N. M. // FTP. 2003. Vol. 37, N 8. P. 922]
10. Карачевцева М. В., Страхов В. А., Яременко Н. Г. Туннельно-рекомбинационные токи в неидеальных гетероструктурах InGaAsP/InP // ФТП. — 1994. — 28, № 6. — С. 1027–1031. [Karachevtseva M. V., Strakhov V. A., YAgremenko N. G. // FTP. 1994. Vol. 28, N 6. P. 1027]
11. Круковский С. И., Сукач А. В., Тетьоркин В. В. та ін. Властивості подвійних гетеропереходів $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$, отриманих за різних технологічних режимів // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка. — 2011. — Вып. 46. — С. 71–77. [Krukovskii S. I., Sukach A. V., Tet'orkin V. V. ta in. // Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika. 2011. Iss. 46. P. 71]
12. Берман Л. С. Емкостные методы исследования полупроводников. — Л.: Наука, 1972. [Berman L. S. Emkostnyye metody issledovaniya poluprovodnikov. Leningrad: Nauka, 1972]
13. Константинов О. В., Мезрин О. А. Влияние последовательного сопротивления диода Шоттки на его эффектив-

ную емкость // ФТП. — 1983. — Т. 17, № 2. — С. 305–311. [Konstantinov O. V., Mezrin O. A. // FTP. 1983. Vol. 17, N 2. P. 305]

14. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. — Москва: Мир, 1975. [Milns A., Foikht D. Geteroperekhody i perekhody metall-poluprovodnik. Moscow: Mir, 1975]

15. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Советское радио, 1979. [Sharma B. L., Purokhit R. K. Poluprovodnikovyye geteroperekhody. Moscow: Sovetskoe radio, 1979]

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.03 2012 г.

Vakiv N.M., Krukovskii S.I., Sukach A.V., Tetyorkin V.V., Mrykhin I.A., Mikhachchuk Yu.S., Krukovskii R.S. **Properties of double $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$ heterojunctions obtained by LPE method.**

Keywords: epitaxial heterostructures, liquid-phase epitaxy, doping, electroluminescence, photosensitivity.

The double epitaxial $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$ heterostructures with coinciding electrical and metallurgical boundaries has been obtained. Such coincidence is achieved due to growing an additional buffer $n-InP$ layer and decreasing the time for growing an emitter p^+-InP layer heavily doped by zinc. Electroluminescence spectra of such structures have a smaller half-width and the infrared radiation of higher power than the structures in which the $p-n$ -junction is formed in the InGaAsP layer. These heterostructures are designed to create efficient IR LEDs with wavelength of 1,06 μm in spectrum maximum.

Ukraine, Lviv, SPE «Carat»; Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU.

Ваків Н. М., Круковський С. І., Сукач А. В., Тетьоркін В. В., Мрихін І. О., Міхашчук Ю. С., Круковський Р. С. **Властивості подвійних гетеропереходів $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$, виготовлених методом рідкофазної епітаксії.**

Ключові слова: епітаксіальні гетероструктури, рідкофазна епітаксія, легування, електролюмінесценція, фоточутливість.

Отримано епітаксіальні гетероструктури $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$, в яких металургійна та електрична границі збігаються. Це досягається вирощуванням додаткового буферного шару $n-InP$ і зменшенням часу вирощування емітерного p^+-InP -шару, сильно легованого цинком. Спектри електролюмінесценції таких структур мають меншу напівширину та більш високу потужність ІЧ-випромінювання, ніж ті, в яких формується $p-n$ -перехід в InGaAsP-шарі. Гетероструктури призначені для створення ефективних ІЧ-світлодіодів з довжиною хвилі в максимумі спектра 1,06 мкм.

Україна, м. Львів, НВП «Карат»; м Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкар'єва НАНУ.