

# BULETINUL

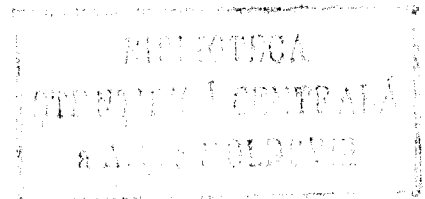
ACADEMIEI DE ȘTIINȚE A REPUBLICII MOLDOVA

FIZICA ȘI TEHNICA

# ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА

ФИЗИКА И ТЕХНИКА



REVISTA TEORETICO-ȘTIINȚIFICĂ  
FONDATA ÎN OCTOMBRIE 1989  
APARE DE TREI ORI PE AN.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ОСНОВАН В ОКТЯБРЕ 1989 ГОДА  
ВЫХОДИТ ТРИ РАЗА В ГОД



3 (15)

1994

Chișinău  
„Știința”  
Кишинев

## СОДЕРЖАНИЕ

### Физика

Соболев В. В. Некоторые неясные вопросы теории экситонов, зон и оптических спектров	3	
Калу́жа Ю. И., Терлецкий А. И., Урсаки В. В. Фотолюминесценция фосфида индия, имплантированного ионами $He^+$	17	Sobo
Кравцов В. Х., Бельский В. К., Болога О. А., Гэрбэлэу Н. В., Лозан В. И., Симонов Ю. А., Малиновский Т. И. Кристаллическая и молекулярная структура дигидразида 4-фенил-тисемикарбазиддиуксусной кислоты	22	Kalu
Касиян В. А., Недеогло Д. Д., Опря С. В. Аномалии температурной зависимости коэффициента Холла и примесная электронно-дырочная проводимость монокристаллов селенида цинка, легированных медью	29	Krao
Касиян В. А., Иванова Г. Н., Недеогло Д. Д., Опря С. В. Фотолюминесценция кристаллов $ZnSe$ , термообработанных в парах соли $MgCl_2$	39	Kasi
Вакару С., Остаф С., Гончаренко Ю., Дойна А. Почти автопараллельные отображения пространств Лагранжа	42	Kasi
Вакару С. И., Гончаренко Ю. А. О точно решаемых моделях четырехмерной квантовой гравитации	53	Vaca
Коварский В. А. От квантовой биохимии к квантовой биофизике. Электрон-колебательные процессы в биомолекулах	58	Vaca
Грабко Д. З., Мединская М. И. Некоторые особенности температурного поведения микротвердости легированных кристаллов $InP$	83	Grab

### Техника

Болога М. К., Савин Н. К. Теплопередающие характеристики электрогидродинамического испарительно-конденсационного термостата	86	Bolo,
Акулинин А. А., Пауков Ю. Н. Особенности использования некоторых оптических методов исследования дисперсных сред. 1. Метод интегрирующих диафрагм на малые углы	88	Akul
Акулинин А. А., Пауков Ю. Н. Особенности использования некоторых оптических методов исследования дисперсных сред. 2. Метод поляризационного отношения для больших углов рассеяния	94	Akul
Болога А. М. Применение заряженных аэрозолей как фактор повышения эффективности процесса газоочистки	102	Bolo,
Овчаренко Н. Я. К вопросу о матрице диагностических параметров крупных электрических машин	108	Ooch
Гремальский А. А., Цуркан Р. К. Система определения местоположения летательного аппарата при посадке	123	Gren
Матееску Т., Которобай В. Расчетные параметры климата	129	Mate
Рефераты	140	Abs



Summary

Many unclear questions of the bands, excitons and optical spectra of crystal: were discussed for the wide energy region of the fundamental absorption.

Поступила 3.02.94

Ю. И. КАЛУЖА, А. И. ТЕРЛЕЦКИЙ, В. В. УРСАКИ

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ФОСФИДА ИНДИЯ,  
ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ  $He^+$

Фосфид индия является перспективным материалом для создания микро- и оптоэлектронных приборов. Изучение локальных центров в этом материале представляет несомненный интерес с точки зрения их влияния на процессы рекомбинации и соответственно на характеристики приборных структур на основе InP. В последнее время большое внимание уделяется изучению центров излучательной рекомбинации в InP, созданных в результате применения ионной имплантации [1—3]. В частности, в фосфиде индия достаточно хорошо изучены люминесценция в околокраевой области спектра (1,36...1,42 эВ) [4—6], а также люминесценция глубоких радиационных и примесных центров [7—9], причем в условиях практически восстановленной кристаллической решетки. Что касается промежуточной области спектра при сравнительно низких температурах отжига ионно-имплантированных кристаллов, то ей было уделено мало внимания.

Целью данной работы является изучение влияния имплантации ионов  $He^+$  и постимплантационного отжига в широком интервале температур на спектры фотолюминесценции InP в области спектра 1,0...1,4 эВ.

Исследовались нелегированные кристаллы фосфида индия  $n$ -типа проводимости, выращенные методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава под давлением аргона. Концентрация электронов при 300 К составляла  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Выращенные кристаллы разрезались на пластины по плоскости (111), которые подвергались механической шлифовке, а затем химической полировке в растворе 2%  $\text{Вг}:\text{СН}_3\text{ОН}$  и кипячению в изопропиловом спирте. Имплантация ионов  $He^+$  проводилась на ускорителе фирмы High Voltage Engineering Еuroра при комнатной температуре. Доза составляла  $10^{13} \dots 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , энергия ионов 100 кэВ. Постимплантационный отжиг образцов проводился при температурах 400...750°C в течение 15 мин в атмосфере  $\text{H}_2$ . При этом имплантированные образцы прижимались face to face с чистыми пластинами InP для уменьшения потерь фосфора с поверхности кристалла. Спектры ФЛ измерялись при температуре 77 К на решеточном монохроматоре SPM-2 со спектральным разрешением не хуже 1 мэВ. Фотоприемником служило фотосопротивление PbS, электрический сигнал с которого регистрировался в режиме синхронного детектирования на частоте  $\approx 230 \text{ Гц}$  при помощи усилителя Uni-rap 232В. Возбуждение ФЛ осуществлялось излучением аргонового лазера с длиной волн 488 и 514 нм.

На рис. 1 показаны спектры ФЛ исходных кристаллов  $n$ -InP, а также имплантированных образцов при дозе  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  для разных температур постимплантационного отжига. Как видно из рисунка, спектр исходных кристаллов состоит из краевой полосы при 1,405 эВ, полосы  $D-A$  рекомбинации при 1,376 эВ, а также двумя повторениями при 1,333 и 1,290 эВ и широкой полосы ФЛ с максимумом при 1,14 эВ. Согласно литературным данным [4] полоса ФЛ при 1,376 эВ связана с

© Калужа Ю. И., Терлецкий А. И., Урсаки В. В. 1994.

2 Comanda nr. 200







Рис. 2. Схема энергетических уровней и электронных переходов в кристаллах  $n$ -InP, имплантированных ионами  $He^+$

но образование акцепторных уровней  $A_1$  и  $A_3$  и донорных уровней  $D_2$ — $D_4$ , представляющих, вероятно, радиационные дефекты или комплексы радиационных дефектов с неконтролируемыми примесями. Уровень  $A_3$  можно приписать второму зарядовому состоянию антиструктурного дефекта InP [6]. Уровень, близкий к  $D_2$ , был обнаружен в монокристаллах InP, облученных электронами [10]. Что касается уровня  $D_4$ , то, как было показано раньше [11], в области  $E_c - 0,3...0,4$  эВ в результате радиационной обработки InP образуется серия донорных уровней, которые приводят к закреплению уровня Ферми. Переход электронов с уровня  $D_1$  на  $A_1$  обуславливает излучение с энергией 1,396 эВ. Полоса люминесценции при 1,396 эВ отчетливо выделяется в спектрах ФЛ кристаллов, отожженных при 500°C (рис. 1). Дублет в спектрах ФЛ при 1,281 и 1,264 эВ, вероятно, вызван переходом электронов с уровней  $D_1$  и  $D_2$  на уровень  $A_3$ . Дублет при 1,180 и 1,160 эВ можно объяснить переходом электронов с уровня  $D_3$  на уровни  $A_1$  и  $A_2$  соответственно. Полосы ФЛ при 1,080 и 1,060 эВ можно отнести к переходам электронов с уровня  $D_4$  на уровни  $A_1$  и  $A_2$  соответственно. Что касается полосы ФЛ при 1,037 и 1,019 эВ, то разница между энергиями этих полос и энергиями 1,080 и 1,060 эВ соответственно составляет  $\approx 42$  мэВ, что совпадает с энергией LO фонона в InP. Следовательно, полосы при 1,037 и 1,019 эВ можно считать LO-фононными повторениями полос при 1,080 и 1,060 эВ соответственно. Полосу ФЛ при 1,117 эВ также можно связать с LO-фононным повторением полосы при 1,160 эВ. Полоса ФЛ при 1,242 эВ, вероятно, является фононным повторением полосы при 1,280 эВ с участием TO фонона, энергия которого в InP равна 38 мэВ [12]. Выделяющийся пик при 1,341 эВ, по-видимому, является фононной репликой полосы при 1,357 эВ с участием LA фонона [12].

Отжиг имплантированных  $He^+$  кристаллов InP приводит к возрастанию интенсивности краевой ФЛ, что объясняется упорядочением кристаллической решетки и исчезновением каналов безызлучательной рекомбинации. На рис. 3 показаны кривые изохронного отжига для основных полос ФЛ при пяти температурах 500...750°C. Заметна явная корреляция между энергиями основными пиков ФЛ. Как видно из рис. 3, интенсивность основных полос ФЛ резко уменьшается в области

2\*



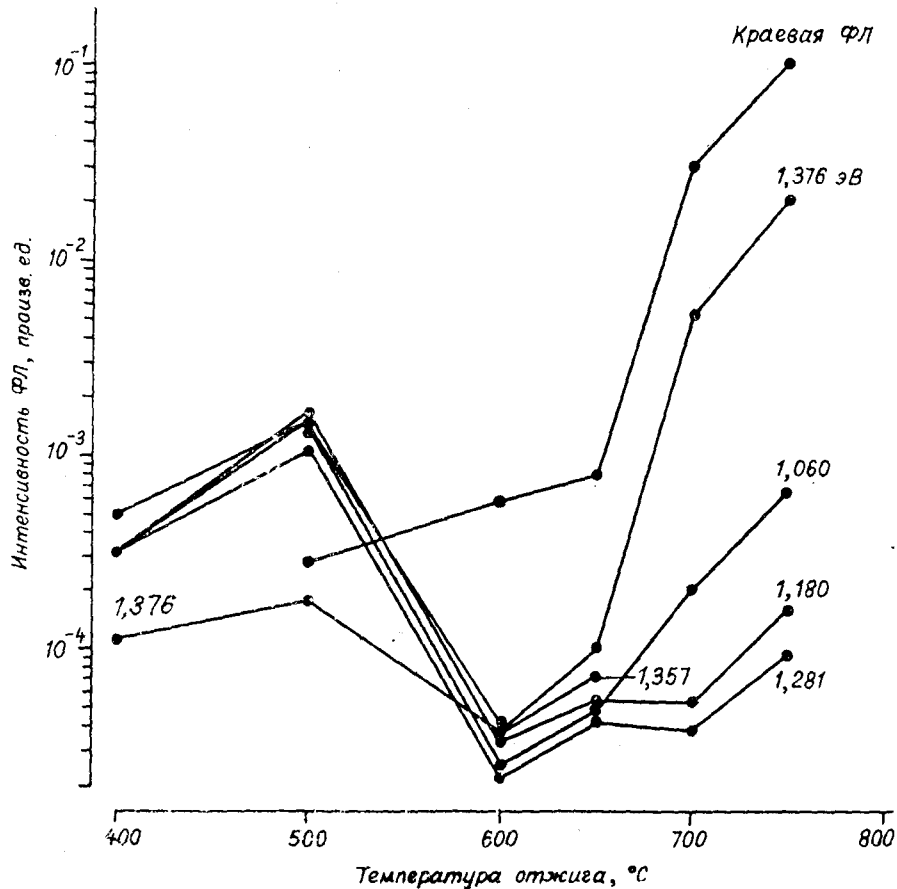


Рис. 3. Зависимость интенсивности краевой ФЛ и отдельных полос ФЛ от температуры изохронного отжига. Интенсивность краевой ФЛ исходных кристаллов n-InP принята за единицу

температур отжига 500...600°C. Следовательно, эти полосы могут быть обусловлены дефектами одной природы, которые отжигаются при этой температуре.

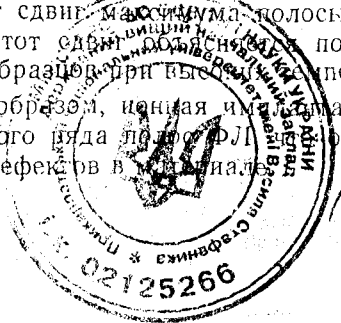
Необходимо отметить сдвиг максимума краевой полосы в коротковолновую область спектра в результате ионной имплантации и последующий возврат ее максимума к первоначальному положению в процессе постимплантационного отжига (рис. 1). Можно предположить, что сдвиг краевой полосы ФЛ обусловлен радиационными дефектами и он может служить для оценки степени разрушения кристаллической решетки. Заметим, что при температуре отжига  $\geq 750^\circ\text{C}$  максимум полосы возвращается к первоначальному положению, что свидетельствует о практически полном восстановлении решетки. Одновременно при температуре отжига  $\geq 750^\circ\text{C}$  вид спектра ФЛ практически полностью совпадает со спектром исходных кристаллов, с той лишь разницей, что происходит сдвиг максимума полосы в области 1,05...1,2 эВ от 1,14 до 1,08 эВ. Этот сдвиг обусловлен потерями фосфора в приповерхностном слое образцов при высоких температурах отжига [2].

Таким образом, ионная имплантация гелия в InP приводит к появлению целого ряда полос ФЛ, что отражает многообразие набора собственных дефектов в кристалле.

1. Pomrenke C., epitaxial and
2. Georgobiani A librium carrier Stat. Sol. (a).
3. Oberstar J. D., planted semiconductors
4. Temkin H., *Brit. J. Appl. Phys.* 1981. 52,
5. Kirillov D., M annealing of
6. Краевая фотолюминесценция 3,5—4 МГц в InP
7. Eaves L., Smith J. Appl. Phys.
8. Skolnick M. S., photoluminescence in InP
9. Глубокие уровни фосфида индия
10. Georgobiani A A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>//ФТП. 198.
11. On the nature of photoluminescence in InP/N. B. Pyshtun *Cryst. Res. Technol.*
12. An investigation of photoluminescence using Zeeman splitting. W. B. Roys, M. P. 1233—1245.

Este efectuat s  
te cu ioni de He<sup>+</sup>.  
structură fină, situa  
gie de 1,00...1,36 eV  
zițiilor radiative ale

The photoluminescence  
crystals have been in  
1,360... 1,380 eV show  
spectral range emerg  
sition in He<sup>+</sup> implant



ЛИТЕРАТУРА

1. Pomrenke C., Park Y. S., Hengehoid R. Photoluminescence from Mg-implanted, epitaxial and semi-insulating InP//J. Appl. Phys. 1981. 52, N. 2. P. 969—977.
2. Georgobiani A. N., Mikulyonok A. V., Stoyanova I. G., Tighinyanu I. M. Non-equilibrium carrier radiative recombination in indium phosphide single crystals//Phys. Stat. Sol. (a). 1983. 80. P. 109—118.
3. Oberstar J. D., Streetmen B. G. Photoluminescence studies of <sup>4</sup>He- and <sup>9</sup>Be- implanted semiinsulating InP//J. Appl. Phys. 1982. 53, N. 7. P. 5154—5162.
4. Temkin H., Bonner W. A. Photoluminescence study of melt grown InP//J. Appl. Phys. 1981. 52, N. 1. P. 397—401.
5. Kirillov D., Merz J. L., Kalish R., Shatas S. Luminescence study of rapid lamp annealing of Si-implanted InP//J. Appl. Phys. 1985. 57, N. 2. P. 531—536.
6. Краевая фотолуминесценция кристаллов n-InP, облученных электронами с энергией 3,5—4 МэВ/Ф. П. Коршунов, С. И. Радауцан, Н. А. Соболев, И. М. Тигиняну и др.//ФТП. 1989. 23, вып. 9. С. 1581—1583.
7. Eaves L., Smith A. W., Skolnick M. S., Cochayne B. An investigation of the deep level photoluminescence spectra of InP (Mn), InP (Fe) and of undoped InP//J. Appl. Phys. 1984. 55, N. 8. P. 4955—4963.
8. Skolnick M. S., Foulkes E. J., Tuck B. Transition metal diffusion in InP: Photoluminescence investigation//J. Appl. Phys. 1984. 55, N. 8. P. 2951—2969.
9. Глубокие уровни в не легированных и легированных железом монокристаллах фосфида индия/А. Н. Георгобияни, В. Микуленок, С. И. Панасюк, С. И. Радауцан, И. М. Тигиняну//ФТП. 1983. 17, вып. 4. С. 593—598.
10. Георгобияни А. Н., Тигиняну И. М. Антиструктурные дефекты в соединениях A<sup>3</sup>V<sup>5</sup>//ФТП. 1988. 22, вып. 1. С. 3—15.
11. On the nature of radiation defects responsible for Fermi level pinning effect in InP/N. B. Pushnaya, S. I. Radutsan, I. M. Tiginianu, V. V. Ursaki, V. A. Ursull//Cryst. Res. Technol. 1991. 26, N. 6. P. 129—135.
12. An investigation of the 1.36 eV photoluminescence spectrum of heat-treated InP using Zeeman spectroscopy and strain effects/K. R. Duncan, L. Eaves, A. Rumdane, W. B. Roys, M. S. Skolnick, P. J. Dean//J. Phys. C: Solid St. Phys. 1984. 17. P. 1233—1245.

Rezumat

Este efectuat studiul fotoluminiscenței monocristalelor de InP la 77 K implantate cu ioni de He<sup>+</sup>. S-a stabilit că implantarea cu He<sup>+</sup> duce la apariția unei benzi cu structură fină, situate la 1,360...1,380 eV și a câtorva benzi în diapazonul de energie de 1,00...1,36 eV. Este propusă schema nivelurilor defectelor proprii și a tranzițiilor radiative ale electronilor în InP implantat cu He<sup>+</sup>.

Summary

The photoluminescence spectra (at 77 K) of He<sup>+</sup> ion implanted n-InP single crystals have been investigated. It was established that after implantation a band at 1,360...1,380 eV showing a fine structure as well as several peaks in the 1,00...1,36 eV spectral range emerge. The scheme of host defect levels and radiative electron transition in He<sup>+</sup> implanted InP is proposed.

Поступила 4.04.94

