

Лаборатория нанотехнологий и солнечной энергетики ЮНЦ РАН



Многокомпонентные твердые растворы для фотовольтаики

Лунин Л.С., Пащенко А.С.
Санкт-Петербург, 2018

2 Структура доклада



- Свойства МТР
- Особенности выращивания МТР методом ЗПГТ
- Структурные свойства МТР
- МТР для термофотоэлектрических преобразователей
- Лазерное импульсное напыление МТР на подложки кремния
- Пленки TiO_2 для каскадных фотоэлектрических преобразователей

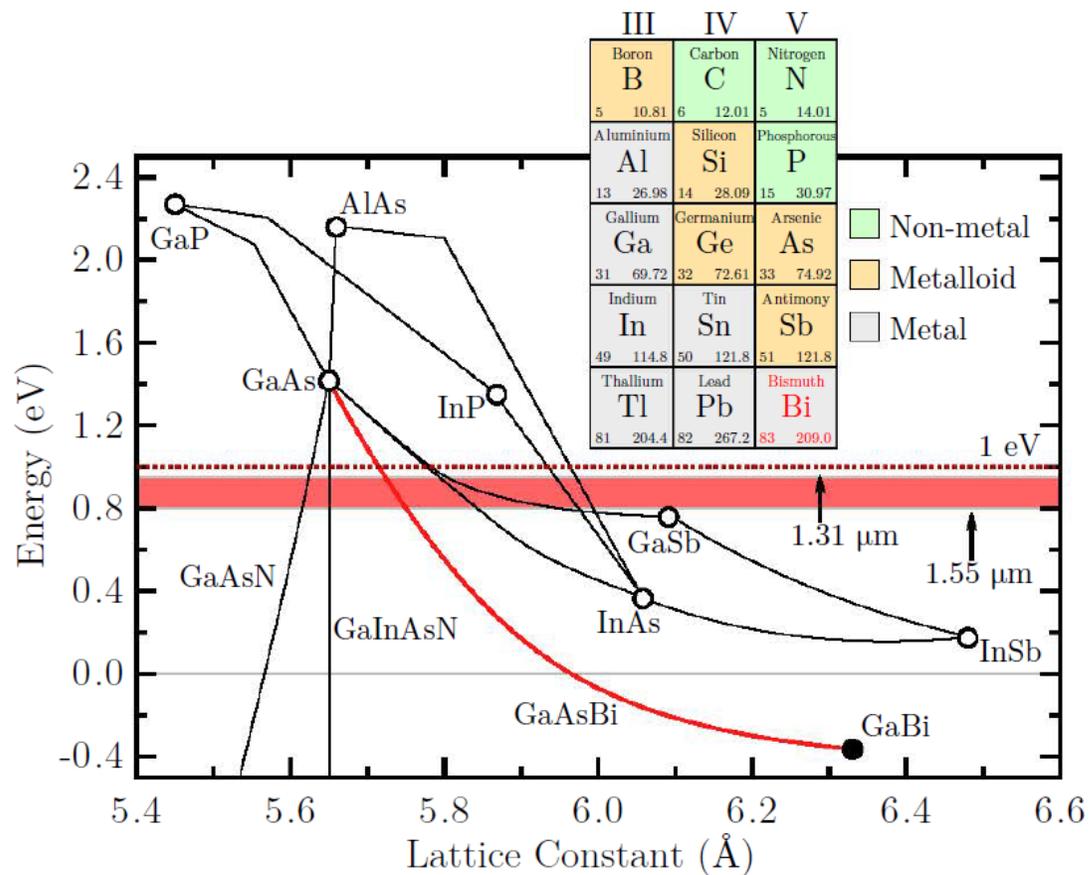
3

Свойства МТР



Рис. 1

Зависимость запрещенной зоны от параметра кристаллической решетки в соединениях A^3B^5



4

Свойства МТР



Рис. 2

Зависимость запрещенной зоны от параметра кристаллической решетки для ПТР на основе A^3B^5

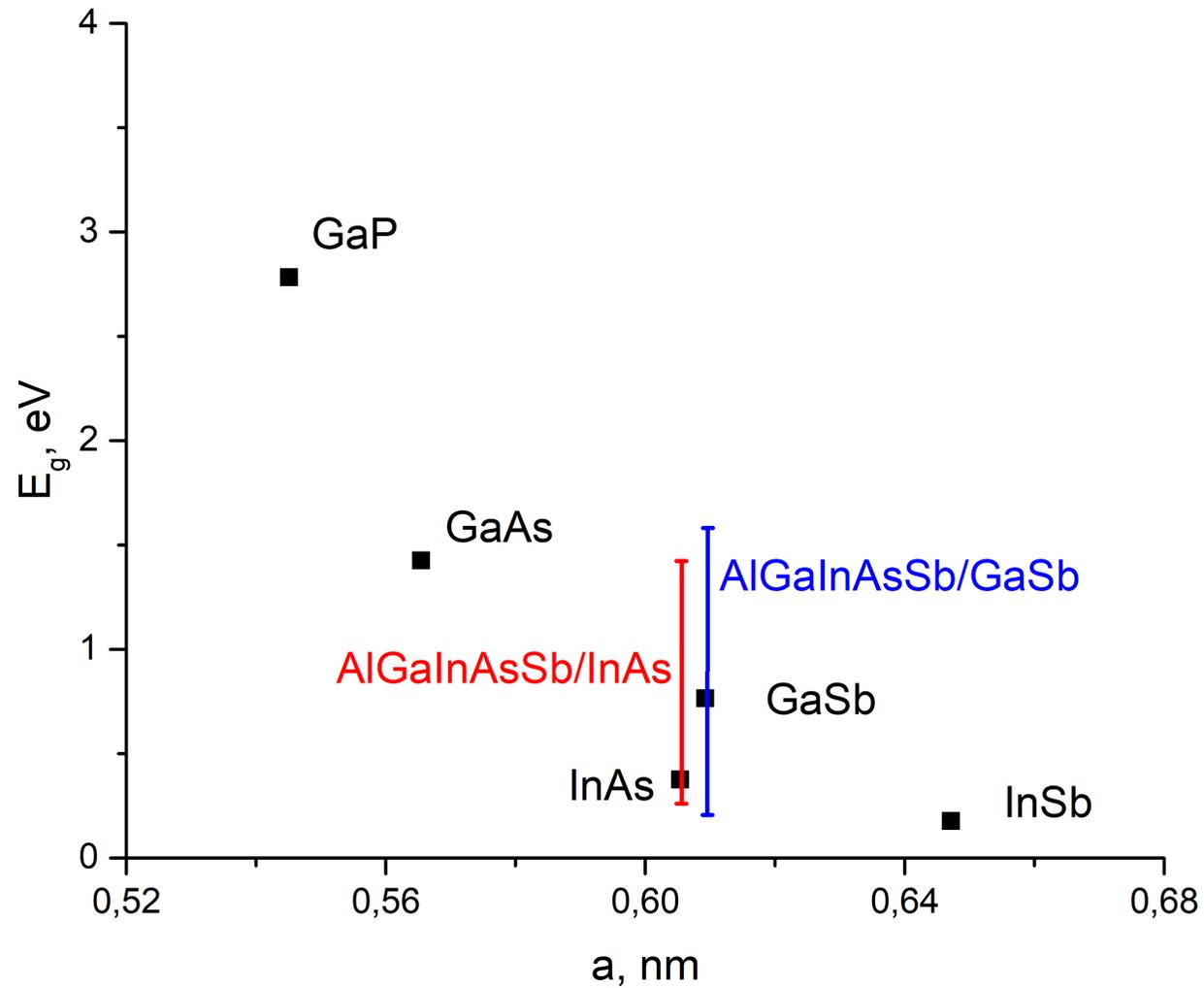




Табл. 1

Области применения
многокомпонентных
твердых растворов,
выращенных на
бинарных подложках

Гетероинтерфейс	E_g , эВ	Применение
InAlGaAsSb/GaSb	0,34–1,49	Фотоэлектрические преобразователи с $E_g=0.9 - 1.1$ эВ, быстродействующие фотоприемники
InAlGaPSb/GaSb	0,34–1,49	
GaInPAsSb/InP	0,71–1,35	Термофотоэлектрические преобразователи, детекторы в волоконных оптических линиях
AlGaInPSb/InAs	0,44–1,12	
AlGaInPSb/InP	0,89–1,40	
AlGaInPSb/GaSb	0,37–1,19	
AlGaInAsSb/InP	0,71–1,75	Термофотоэлектрические преобразователи, детекторы в волоконных оптических линиях
AlGaInAsSb/InAs	0,31–1,37	
AlGaInAsSb/GaSb	0,26–1,33	

6

Свойства МТР

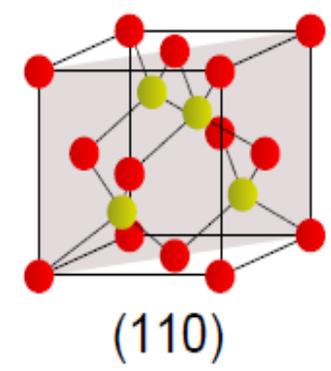
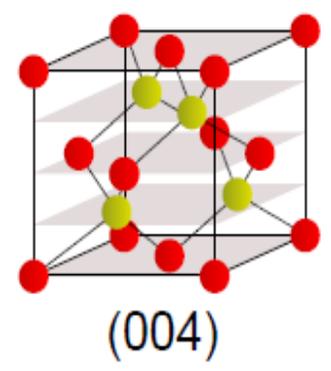
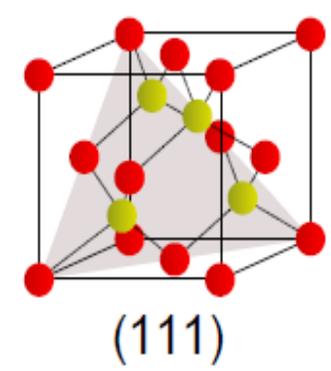
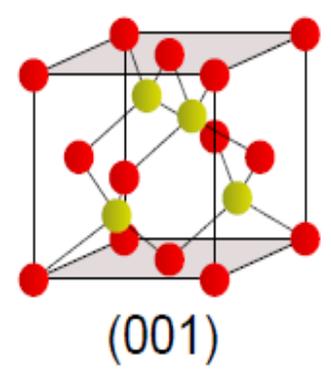
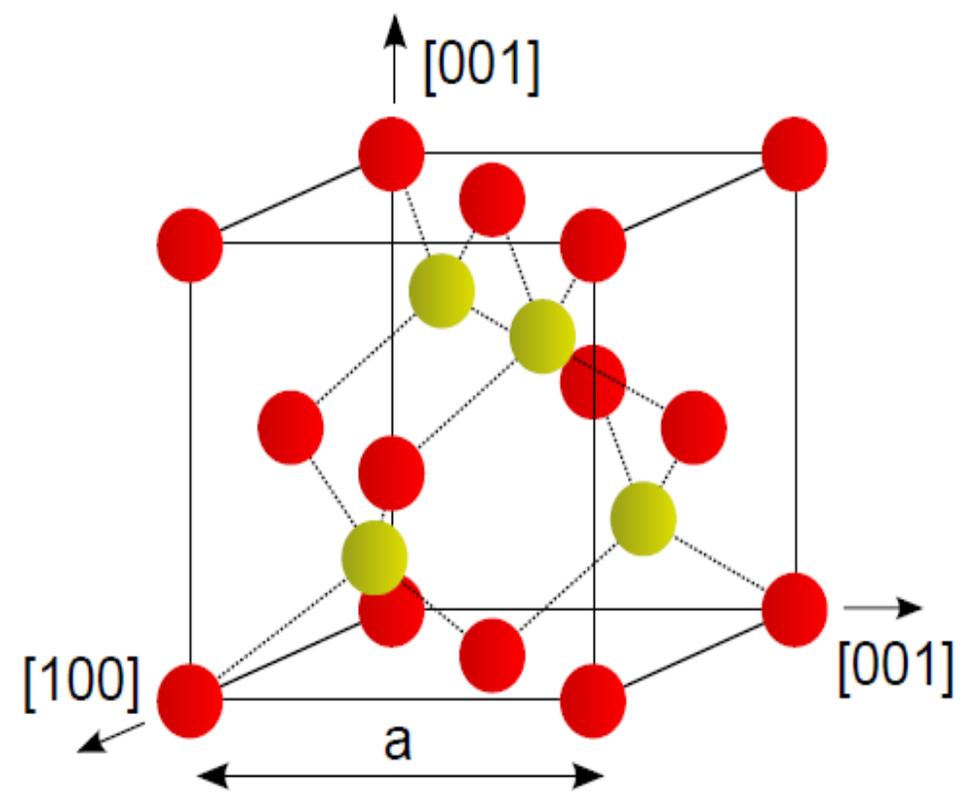
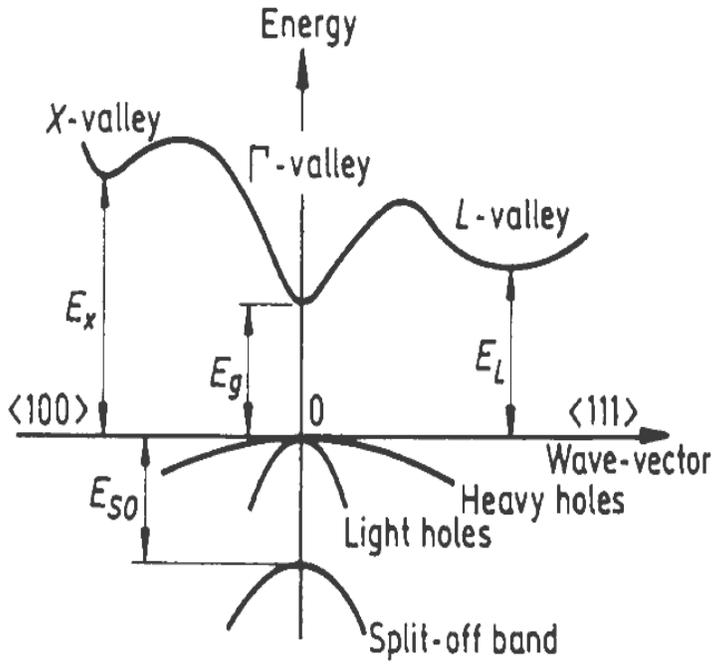
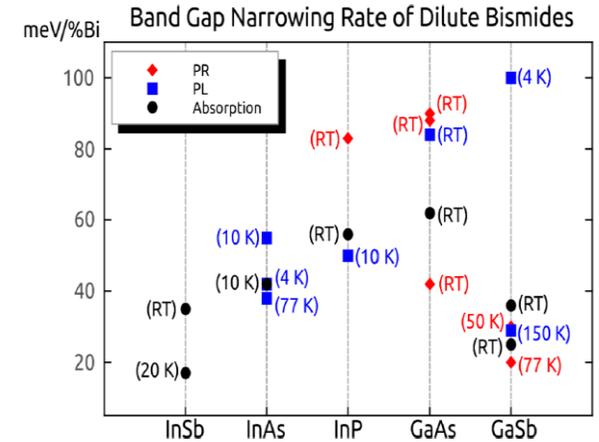
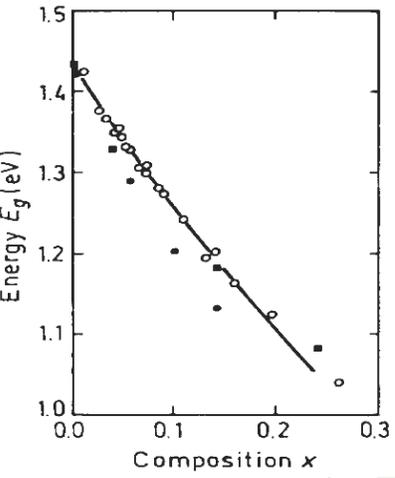
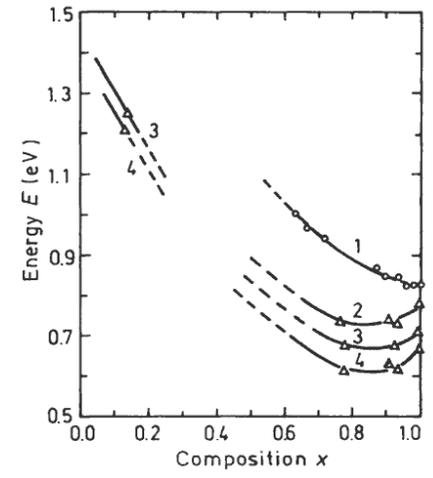
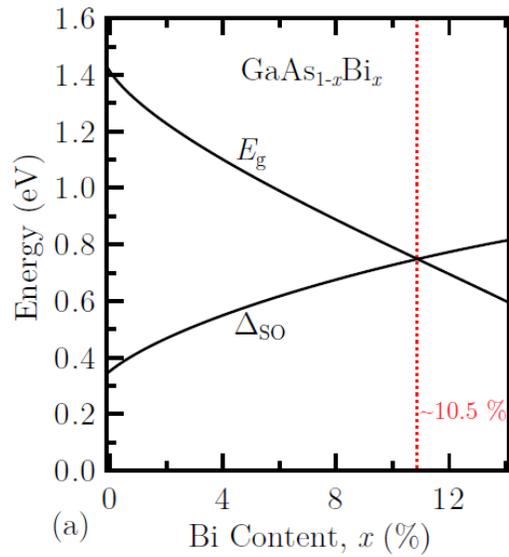


Рис. 3 Элемент кристаллической ячейки типа цинковой обманки



Влияние металлоидов на ширину запрещенной зоны многокомпонентных твердых растворов



Кривая 1 - энергетический разрыв между L-долиной и профилем тяжелых дырок от концентрации x_{Sb} в TP $GaAs_{1-x}Sb_x$ [Rosenbaum and Woolley (1975)].

Кривые 2-4 зависимость ширины запрещенной зоны TP $GaAs_{1-x}Sb_x$ от состава. $T=100\text{ K}$, 3 - $T=210\text{ K}$, 1,4 - $T=300\text{ K}$. [Taylor and Fortin (1970)].

1. Steele, Julian, Structural and optical studies of $GaAs_{1-x}Bi_x$ and $p-Bi_2O_3$ for optoelectronic devices, Doctor of Philosophy thesis, School of Physics, University of Wollongong, 2015.

2. M. Levinshtein, Michael Shur. Handbook Series on Semiconductor Parameters: Ternary and quaternary III-V compounds. World Scientific, 1999, 205 p.

8

Выращивание МТР



Табл. 2

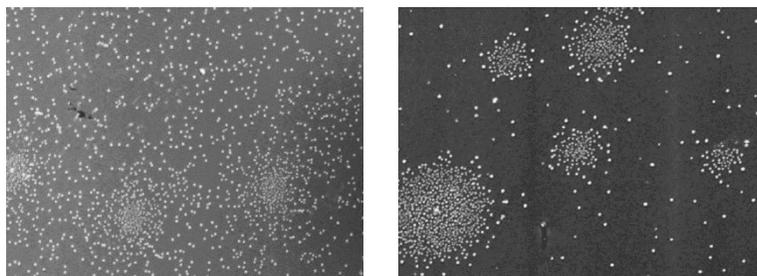
Радиусы химических элементов, входящих в состав изучаемых пленок многокомпонентных твердых растворов.

Подгруппа	Химический элемент	Ковалентный тетраэдрический радиус, нм	Атомный радиус, нм
IIIb	Al	0,126	0,143
	Ga	0,126	0,139
	In	0,144	0,166
Vb	P	0,11	0,13
	As	0,118	0,148
	Sb	0,136	0,161
	Bi	0,146	0,182

9 Выращивание МТР

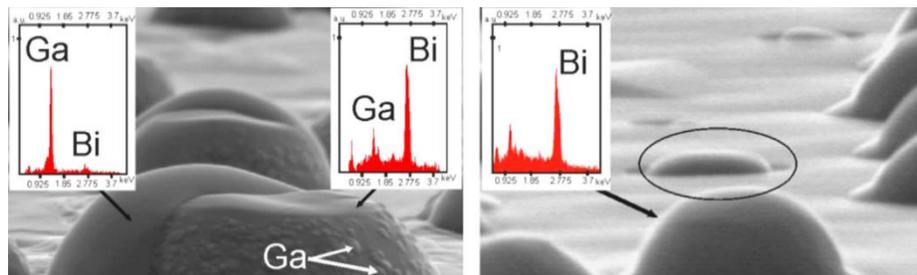
МВЕ

- ▶ Необходимо регулировать отношение компонент V группы при выращивании тонких пленок МТР (As, Bi, Sb, P). Особенно, при осаждении арсенидов.
- ▶ Ограничение по содержанию
- ▶ Bi > 10 ат. %.
- ▶ Образование Al, In, Ga, Bi капель



MOVPE

- ▶ Требует относительно высоких температур эпитаксии. При
- ▶ $T_{\text{подл}} < 450^\circ\text{C}$ проблемы с не полным разложением металлорганических соединений
- ▶ Сегрегация Bi и Sb
- ▶ Образование Al, In, Ga, Bi капель



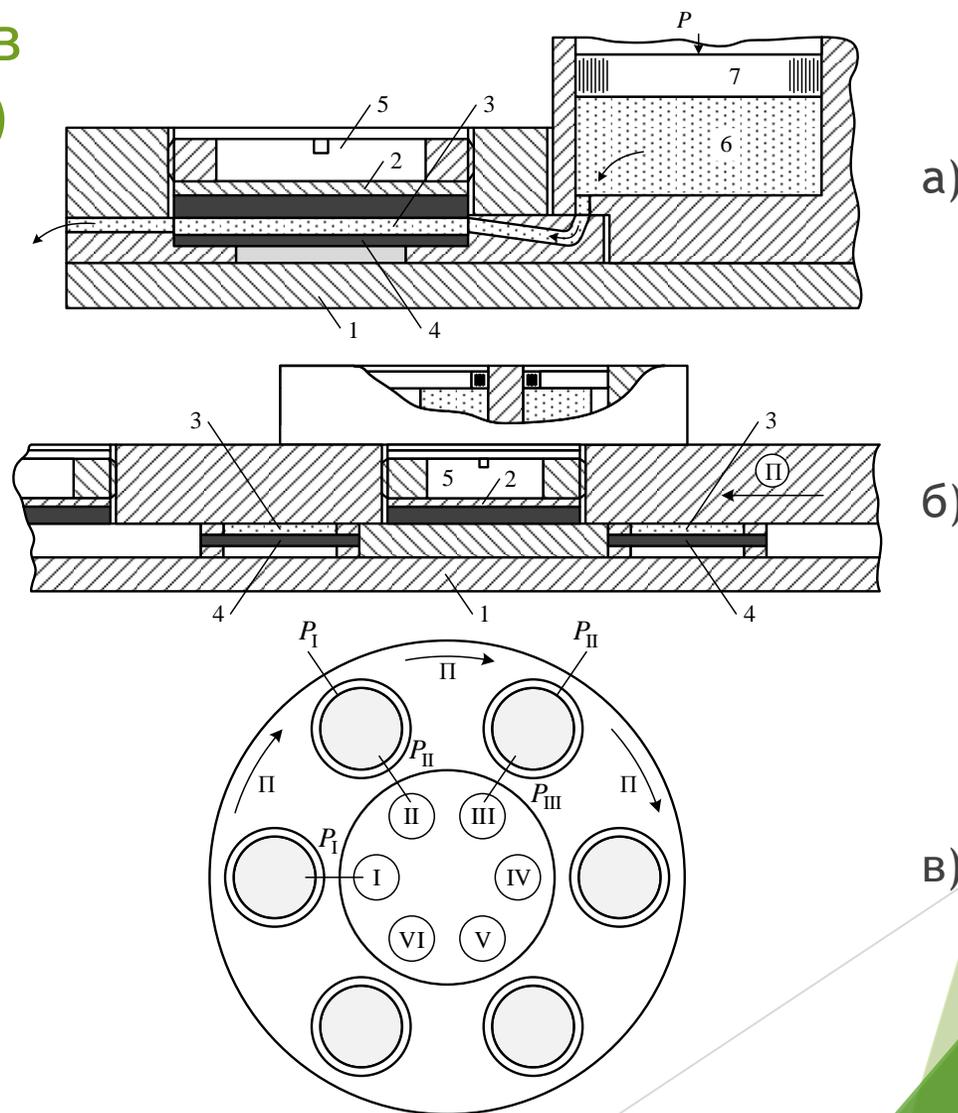
Зонная перекристаллизация в градиенте температур (ЗПГТ)

Рис. 4

Конструкции кассет для ЗПГТ:

- а) поршневого типа;
- б) сдвигового типа;
- в) система вращения контейнеров.

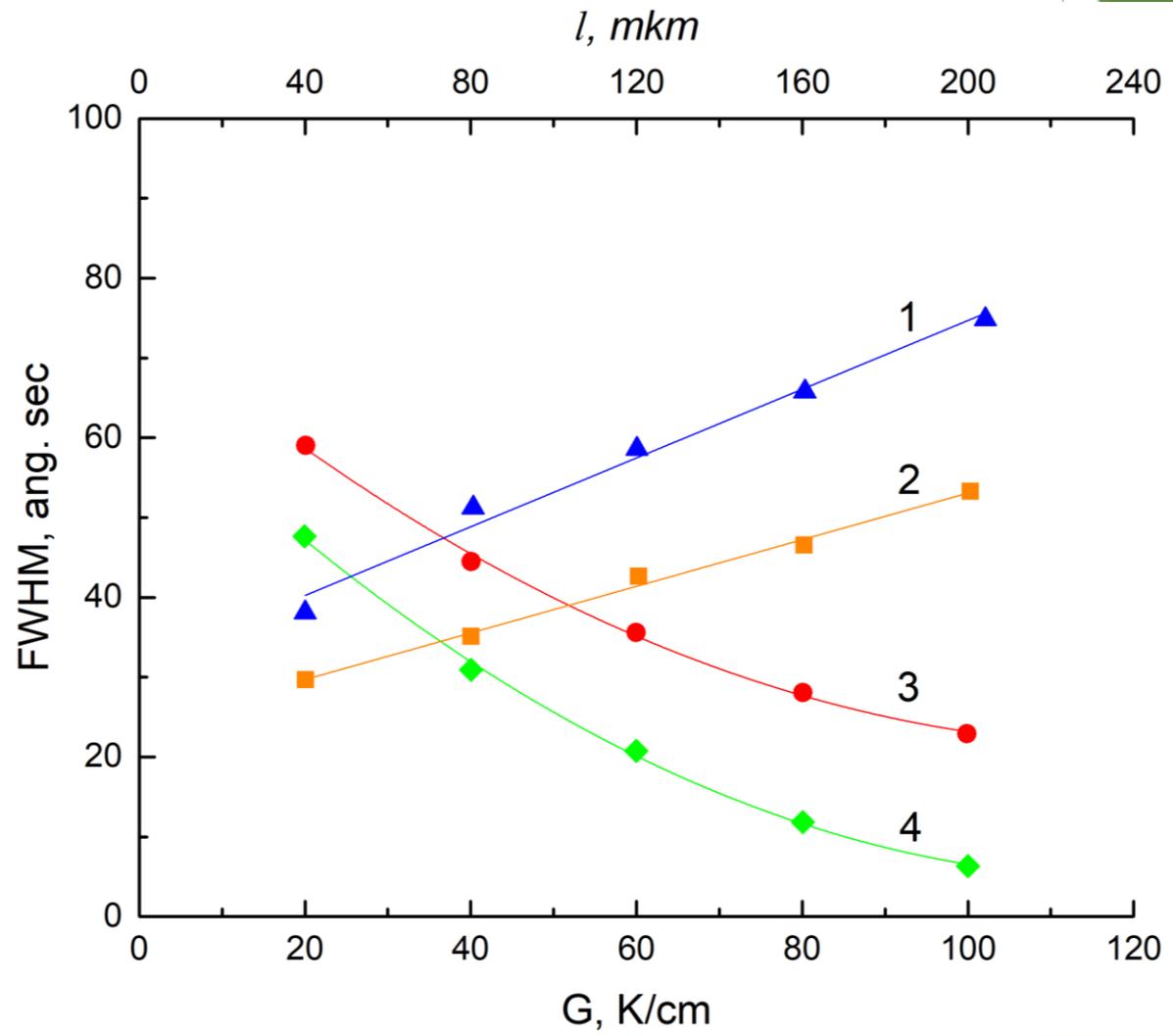
- 1 - графитовая кассета;
- 2 - подложка;
- 3 - расплав;
- 4 - источник для подпитки расплава;
- 5 - держатель;
- 6- резервуар с расплавом;
- 7 - поршень



11 Структурные свойства гетероструктур AlInGaBiSb/GaSb



Рис. 5
Зависимость FWHM КДО для пленок $Al_xIn_yGa_{1-x-y}Bi_zSb_{1-z}$ на GaSb от градиента температуры G , толщины жидкой зоны l и содержания Bi:
1 - $z=0,05$ мол. доли;
2 - $z=0,4$ мол. доли, $l = 70$ мкм;
3 - $z=0,05$ мол. доли;
4 - $z=0,4$ мол. доли, $G = 35$ К/см.

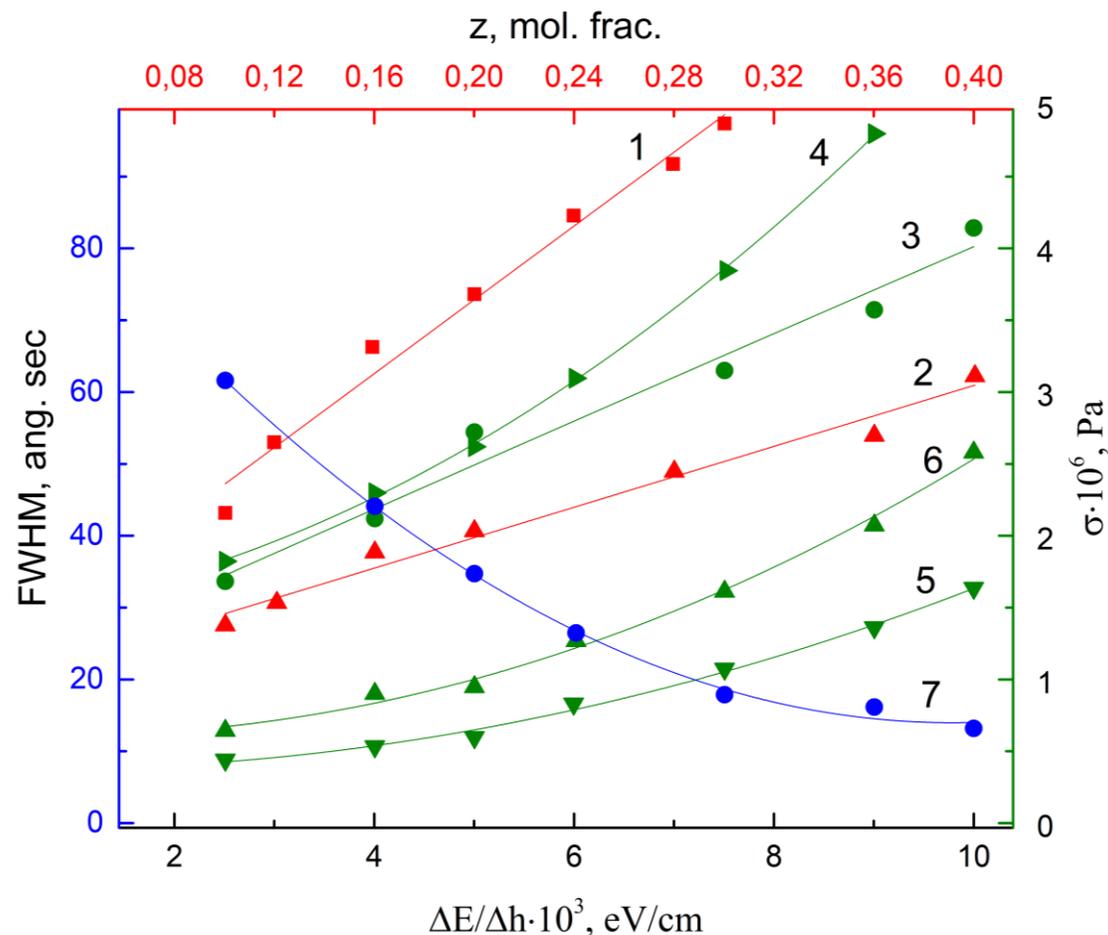


Структурные свойства гетероструктур AlInGaBiSb/GaSb



Рис. 6

Зависимость FWHM КДО для пленок $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{Bi}_z\text{Sb}_{1-z}$ на GaSb (1 - $z=0,1$ мол. доли; 2 - $z=0,4$ мол. доли) от σ для варизонных структур (3,6 - подложка; 4,5 - слой $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{BiSb}$) и от градиента ширины запрещенной зоны (3,4 - $z=0,2$; 5,6 - $z=0,4$). Кривые 1-7 получены при параметрах роста $T=790$ K; $G=60$ K/cm; $l=80$ мкм.



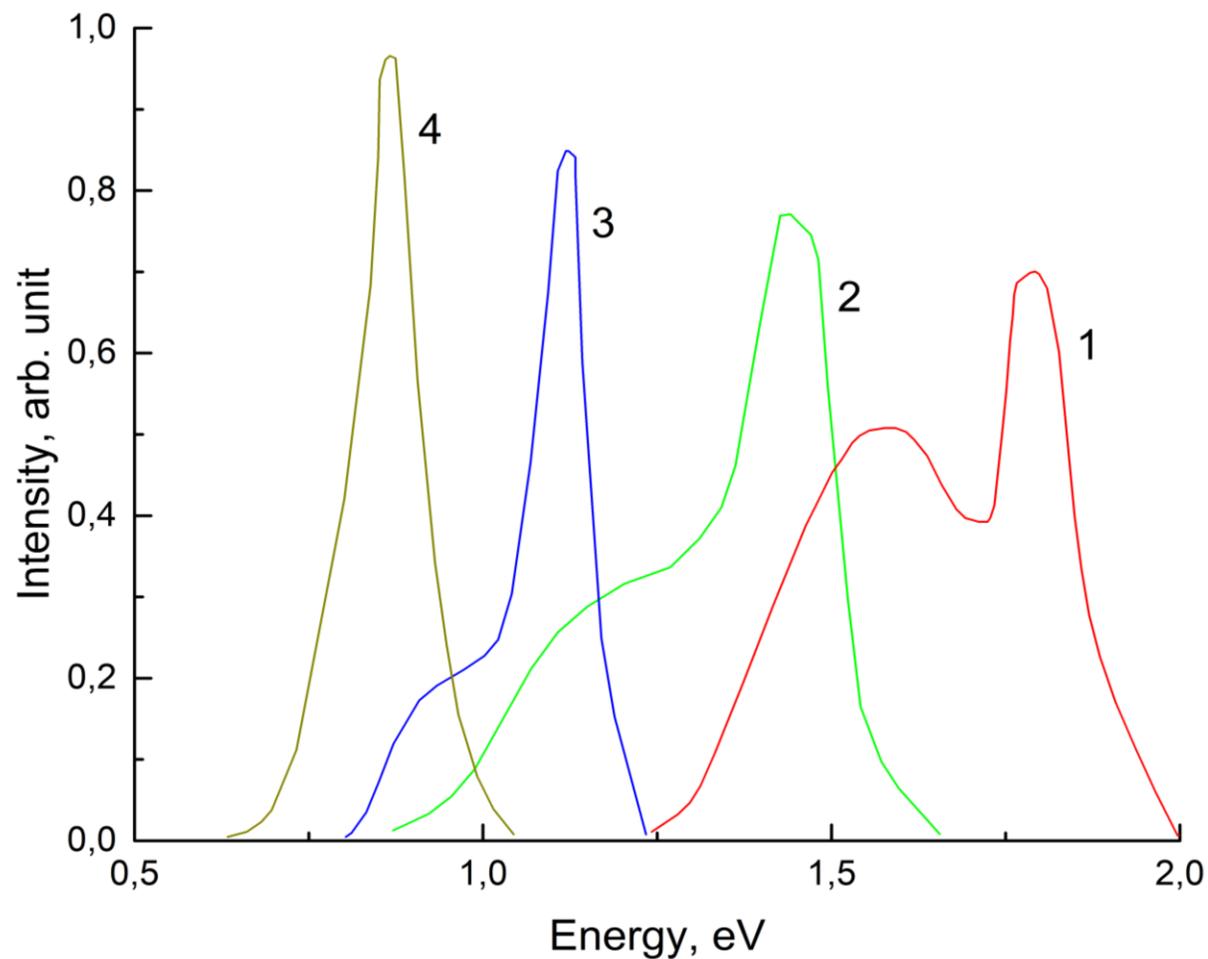
Фотолюминесценция гетероструктур AlInGaBiSb/GaSb



Рис. 7

Спектры ФЛ пленок
 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{Bi}_z\text{Sb}_{1-z}$ (77 K):

- 1 - $z=0$;
- 2 - $z=0,1$ мол.доли;
- 3 - $z=0,2$ мол.доли;
- 4 - $z=0,4$ мол.доли.



14

Структурные свойства гетероструктур GaInSbAsPBi/GaSb



Рис. 8

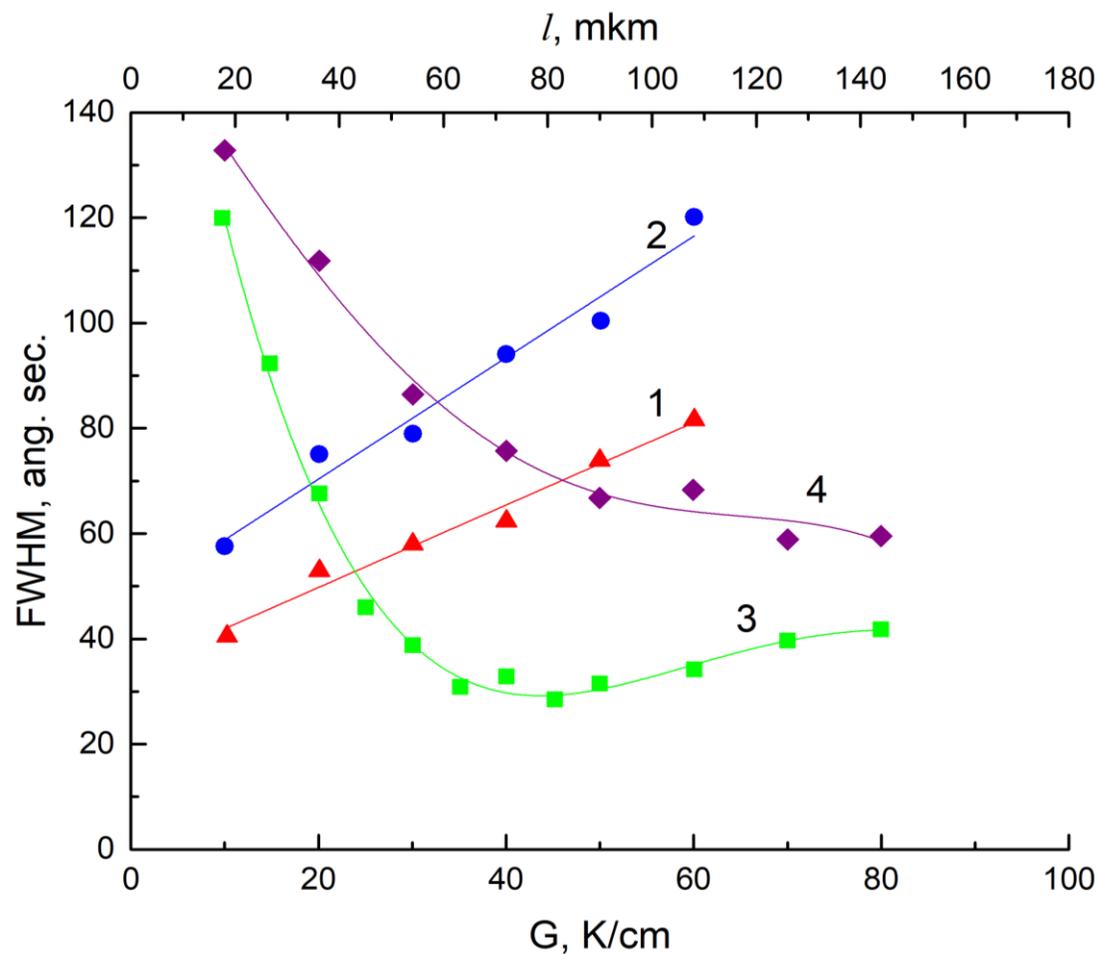
Зависимость FWHM КДО для
Ga_xIn_{1-x}Sb_yAs_{1-y}P_{1-y-z}Bi_z/GaSb
от градиента температуры G
(кривые 1, 2) и толщины жидкой
зоны l (кривые 3, 4) при z_{Bi} :

1 - $z=0,02$ мол. доли;

2 - $z=0,2$ мол. доли;

3 - $z=0,01$ мол. доли;

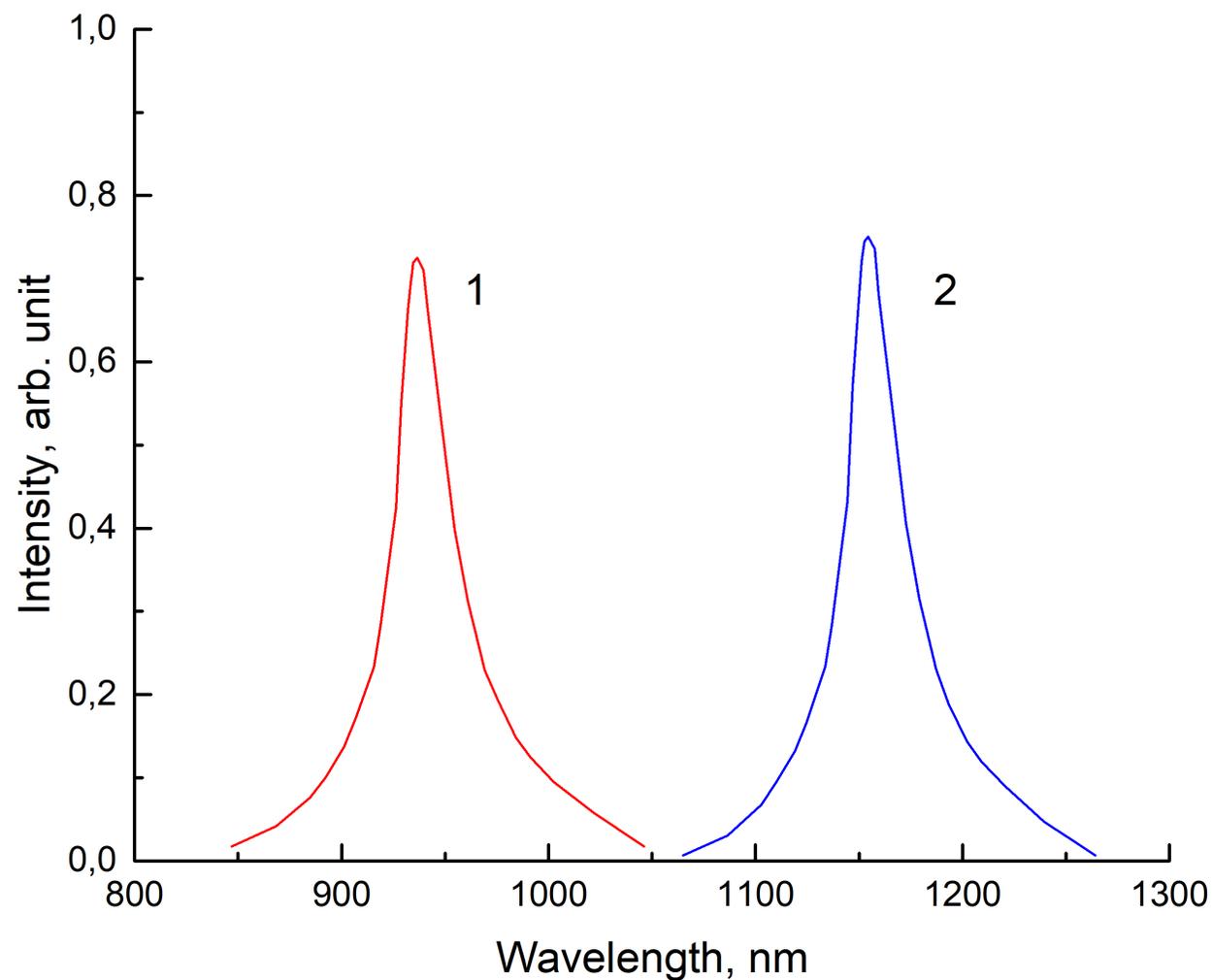
4 - $z=0,35$ мол. доли.



Фотолюминесценция гетероструктур GaInSbAsPBi/GaSb



Рис. 9
Спектры ФЛ
гетероструктур:
1 - GaInSbAsPBi/GaSb;
2 - GaInSbAsP/GaSb.



Гетероструктуры AlInPSbAs/InAs для термофотоэлектрических преобразователей



Рис. 10 Конструкция ТФЭ на основе гетероструктуры AlInPSbAs/InAs

Параметры выращивания:

интервал температур 773-873 К;

эпитаксиальные слои твердых растворов $Al_xIn_{1-x}P_ySb_zAs_{1-x-y}$ с тем же периодом решетки и КТР как у подложки InAs были получены в области составов $0.1 \leq x \leq 0.3$ и $0.2 \leq y \leq 0.3$;

в качестве жидкой зоны использовали раствор - расплав чистых In, Al, P, Sb, As толщиной 10 - 100 μm .

Гетероструктуры AlInPSbAs/InAs для термофотоэлектрических преобразователей

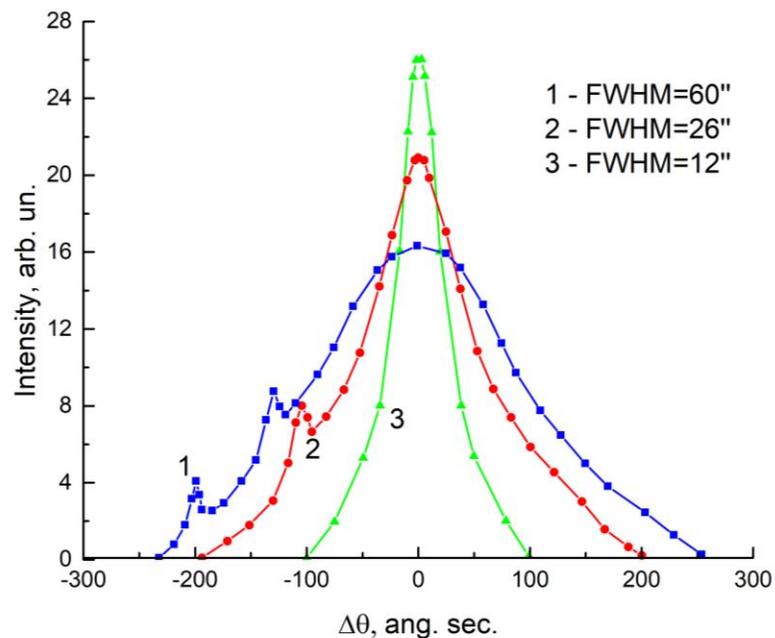


Рис. 11 Кривые дифракционного отражения гетероструктур:
1 – InSbAs/InAs, 2- InPSbAs/InAs,
3- AlInPSbAs/InAs.

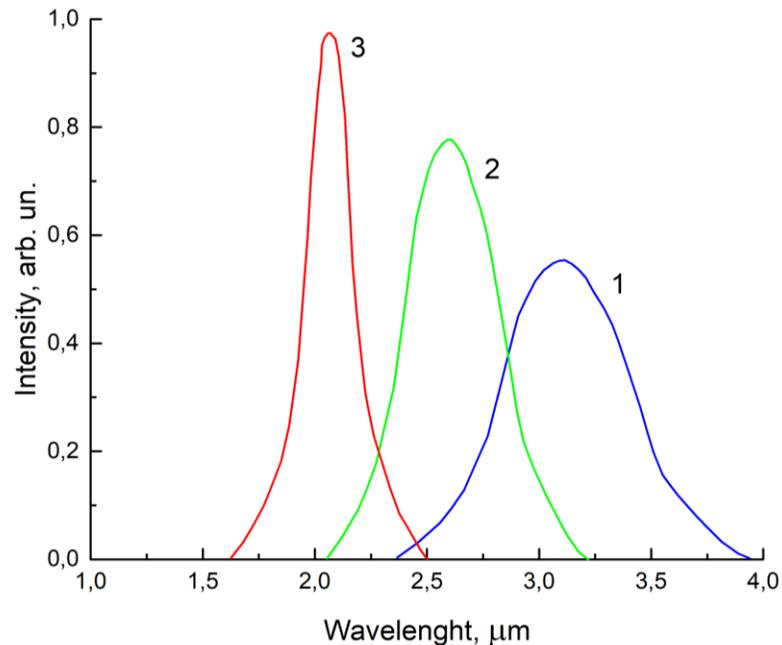


Рис. 12 Спектры фотолюминесценции гетероструктур: 1 – InSbAs/InAs,
2- InPSbAs/InAs, 3- AlInPSbAs/InAs.

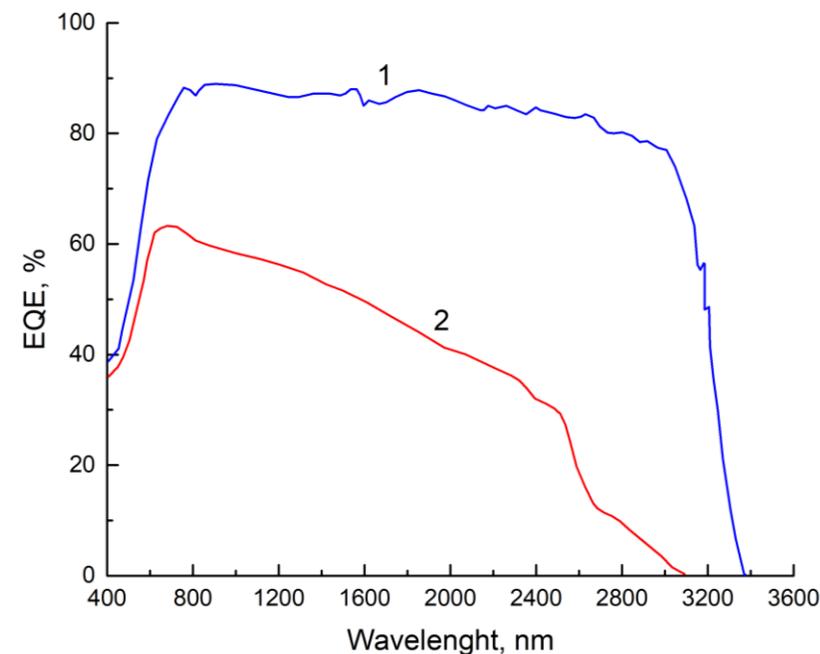


Рис. 13 Внешний квантовый выход гетероструктур:
1 – p-AlInPSbAs/n-AlInPSbAs/n-InAs,
2 - p-InPSbAs/n-InPSbAs/n-InAs.

18 Лазерное импульсное напыление гетероструктур AlGaAs/Si и GaP/Si



Конструкции гетероструктур AlGaAs/Si и GaP/Si

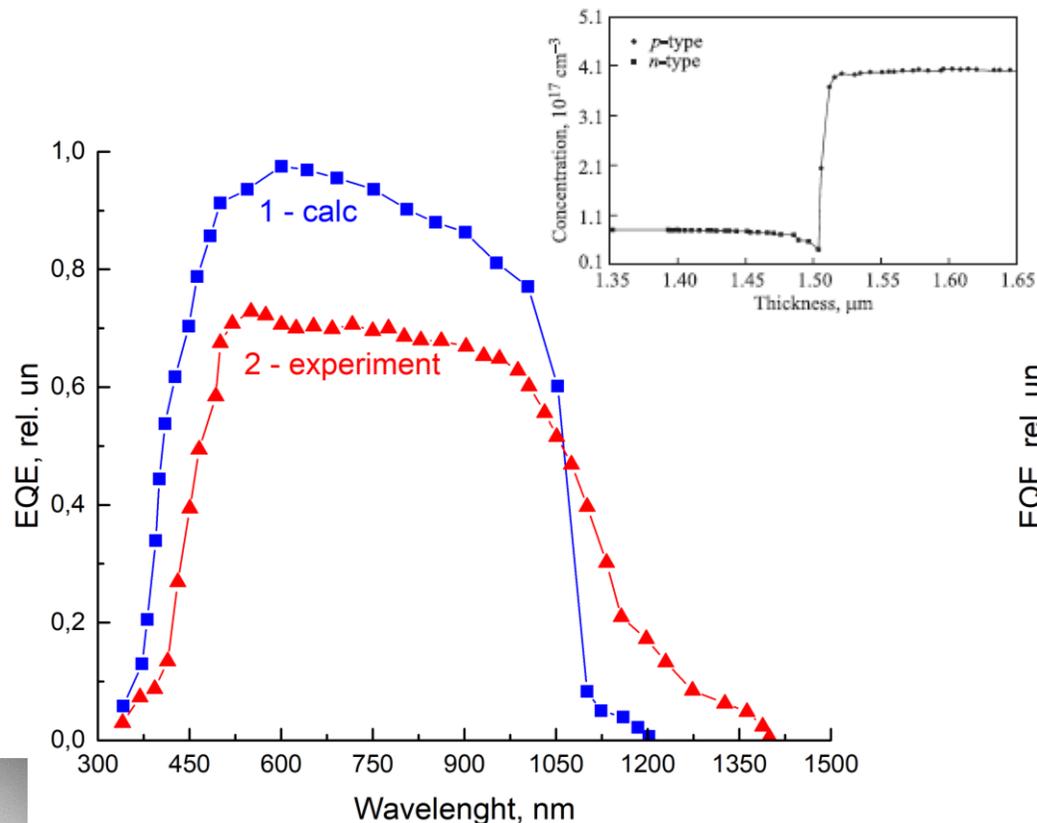
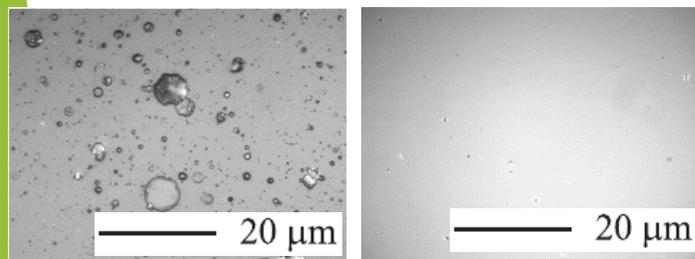


Рис. 14 Спектральная зависимость гетероструктуры на основе $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Si$: 1 — расчет, 2 — эксперимент

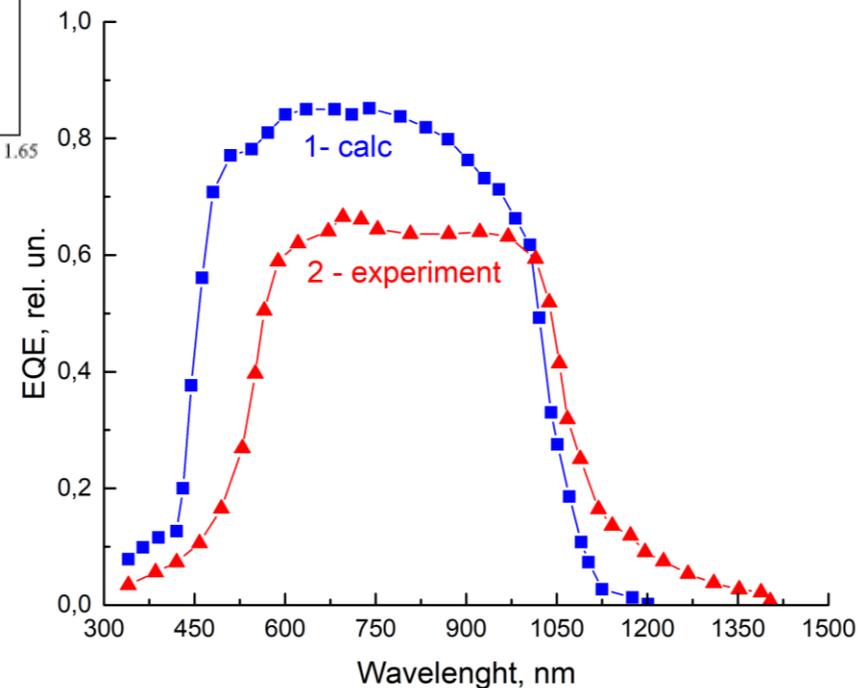


Рис. 15 Спектральная зависимость гетероструктуры на основе GaP/Si: 1 — расчет, 2 — эксперимент.

19 Лазерное импульсное напыление гетероструктур AlInGaPAs/GaAs/Si

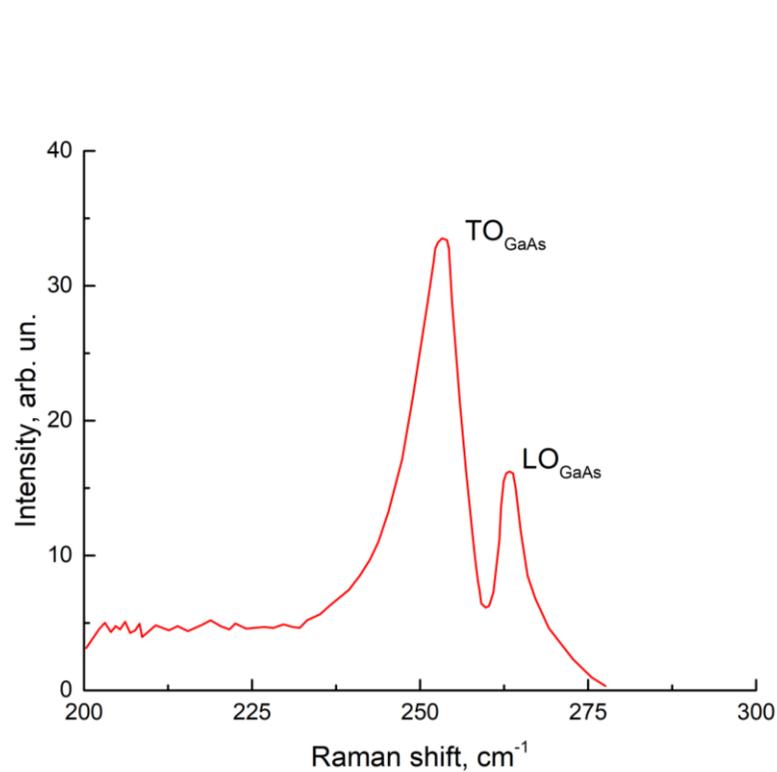


Рис. 16 Спектр КРС нанопленки GaAs на Si.

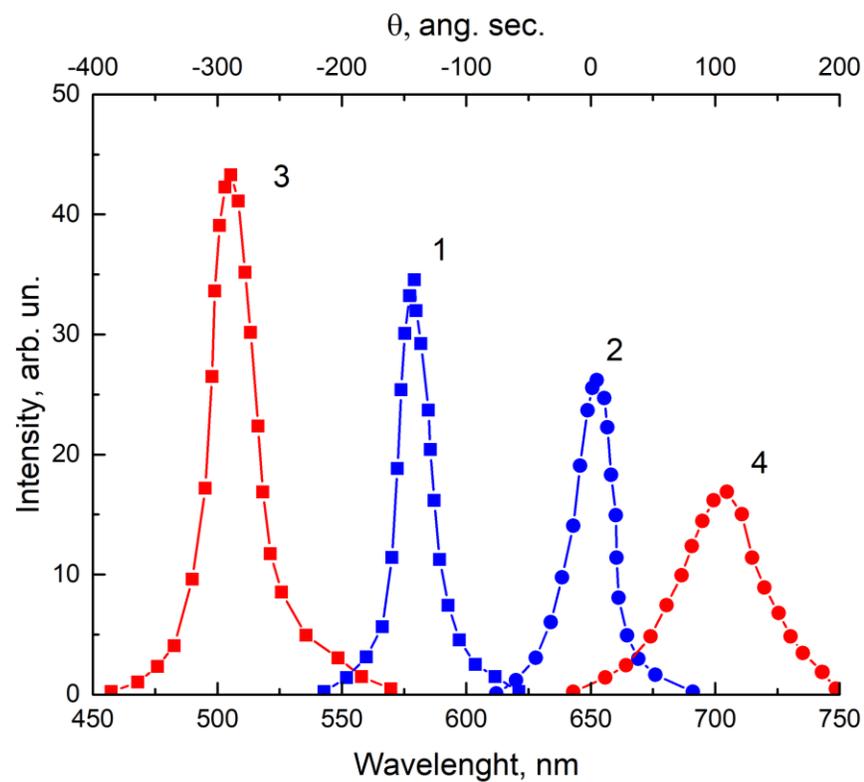


Рис. 17 Кривые дифракционного отражения (кривые 1, 2) и спектры ФЛ (кривые 3, 4) пленок: AlInGaPAs (1, 3) и GaAs (2, 4), соответственно.

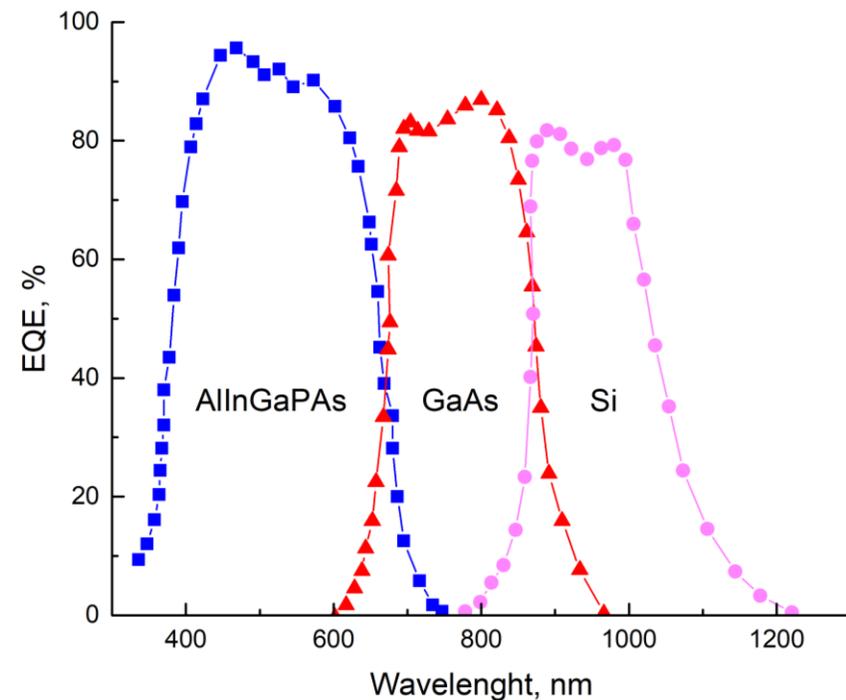


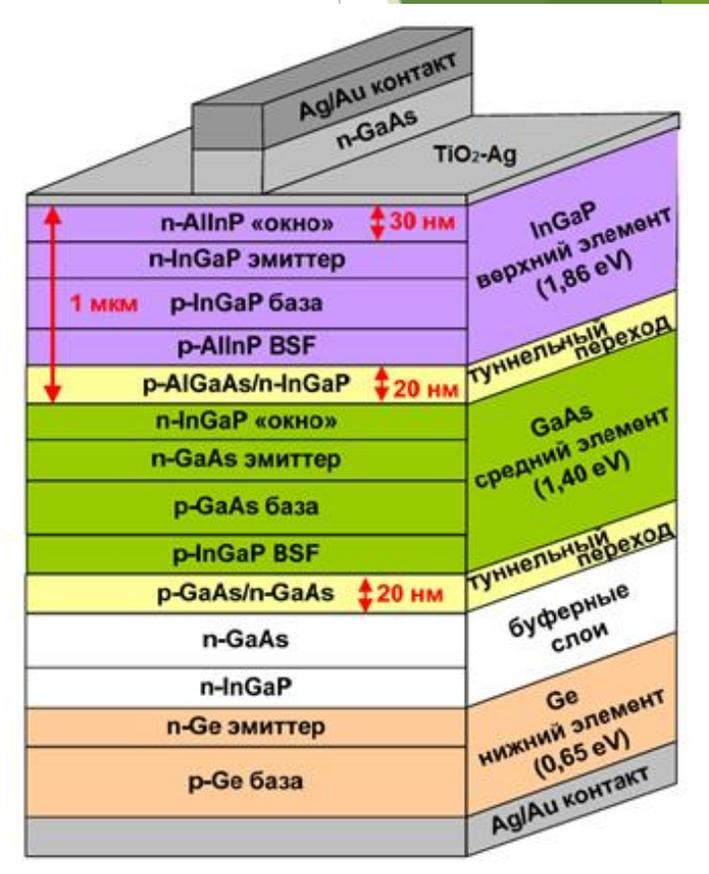
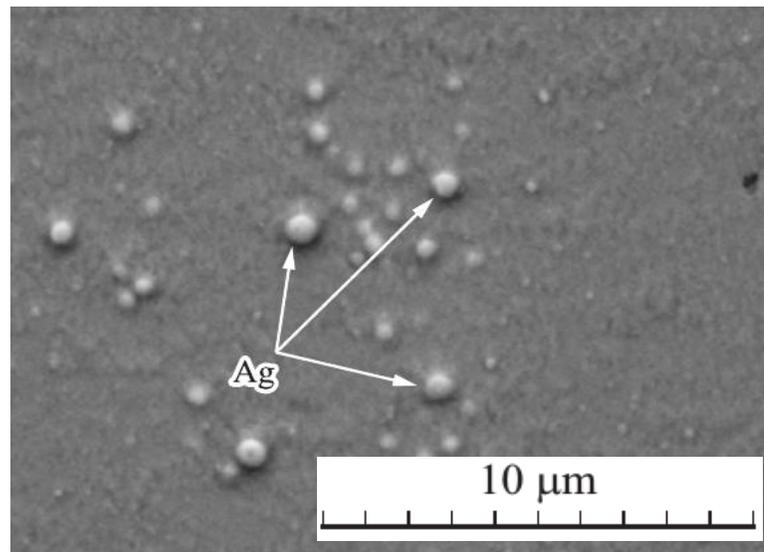
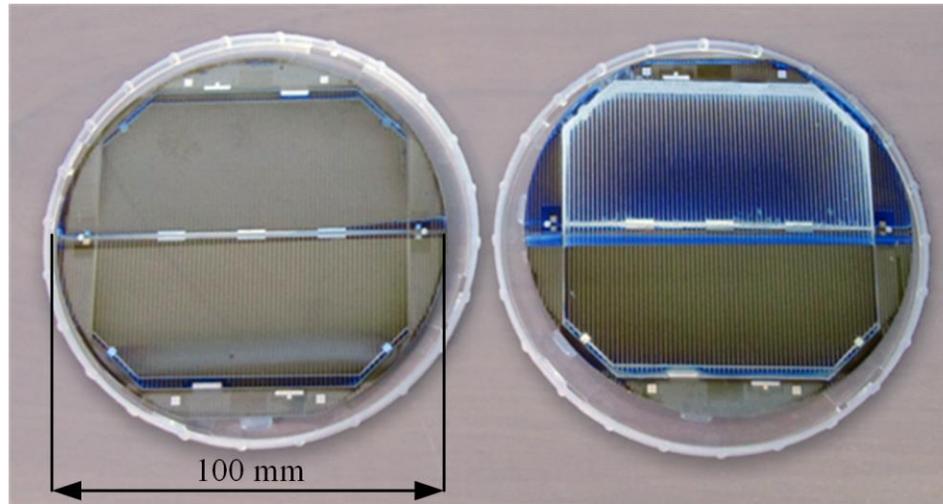
Рис. 18 Спектры внешней квантовой чувствительности ФЭП AlInGaPAs/GaAs/Si.

20 Пленки $\text{TiO}_2\text{-Ag}$ для каскадных ФЭП



Рис. 19

Фотография и конструкция экспериментальных образцов СЭ GaInP/GaAs/Ge с покрытием $\text{TiO}_2\text{-Ag}$



21 Пленки TiO_2 -Ag для каскадных ФЭП



Рис. 20

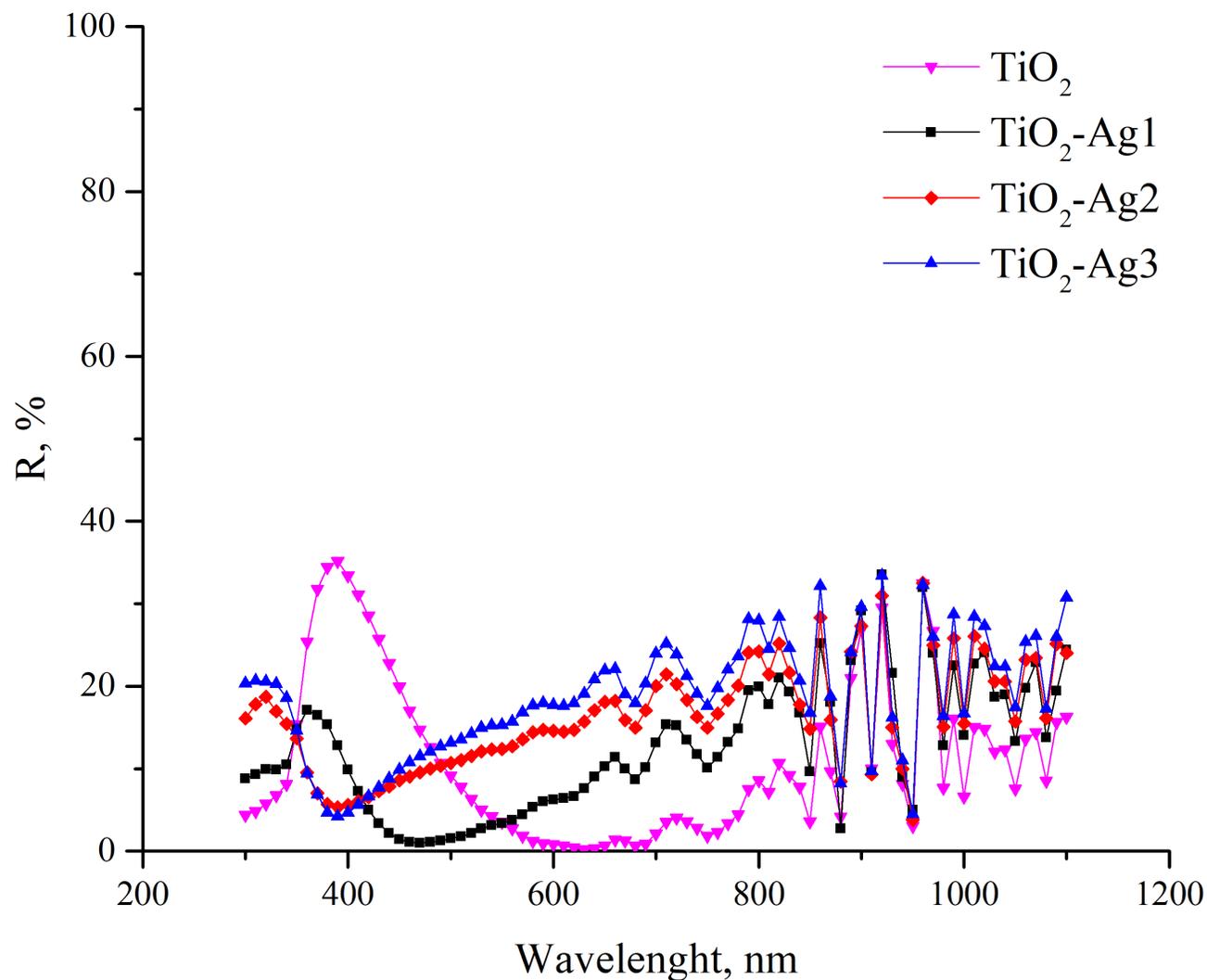
Спектральная зависимость коэффициента отражения экспериментальных образцов с покрытиями TiO_2 -Ag

Содержание наночастиц серебра в исходном растворе для получения пленок:

TiO_2 -Ag1 — $1,12 \cdot 10^{-5}$ моль/л,

TiO_2 -Ag2 — $2,24 \cdot 10^{-5}$ моль/л,

TiO_2 -Ag3 — $3,36 \cdot 10^{-5}$ моль/л.



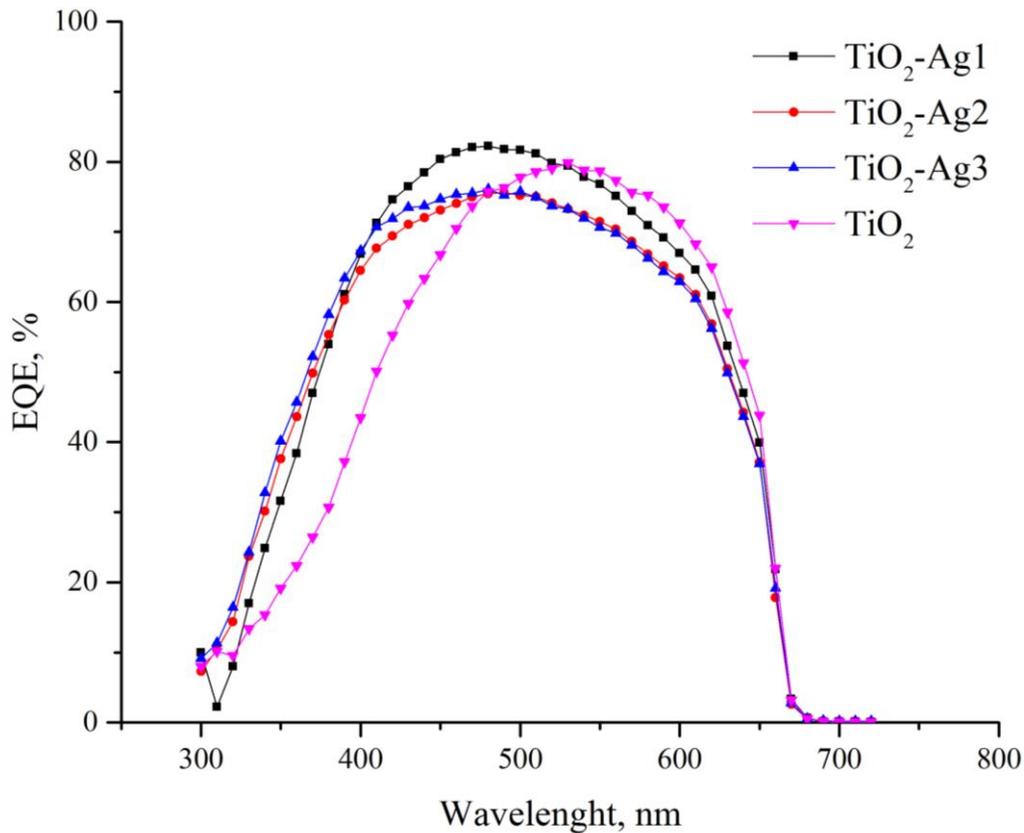


Рис. 21 Влияние концентрации Ag на спектральную зависимость внешнего квантового выхода верхнего каскада GaInP

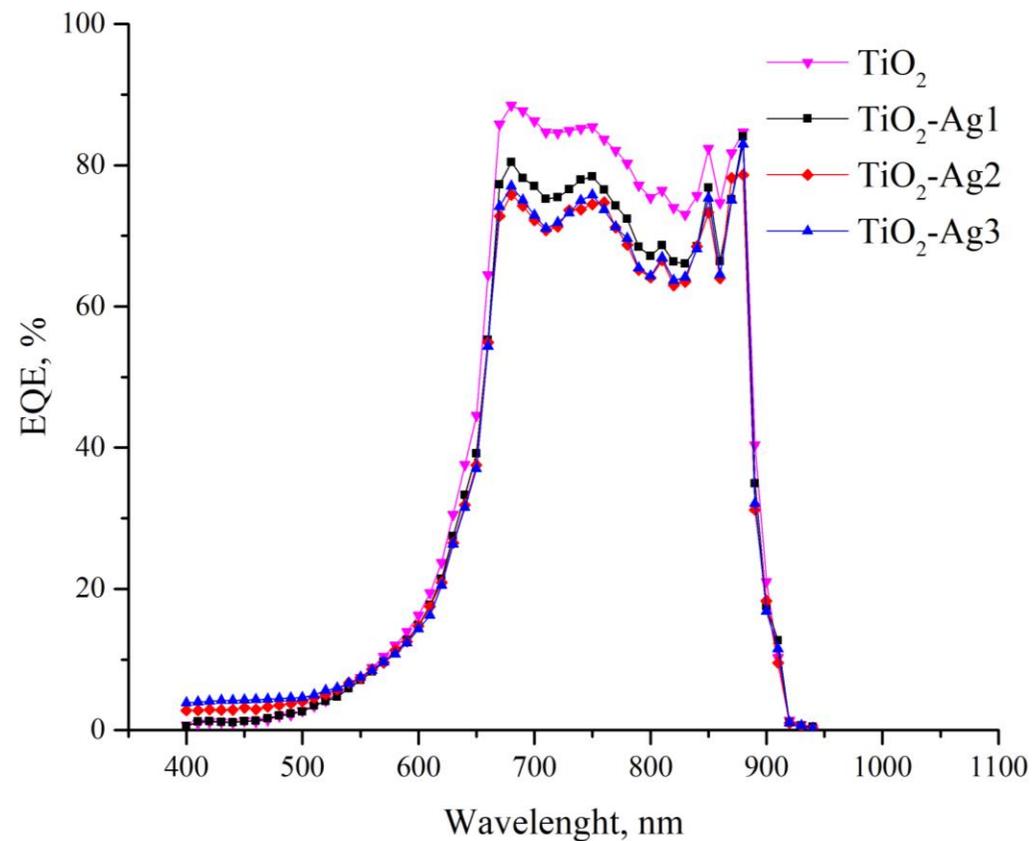


Рис. 22 Влияние концентрации Ag на спектральную зависимость внешнего квантового выхода среднего каскада GaAs.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

2018