

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Глинчук К. Д., Заяц Н. С., Прохорович А. В.

Изучено влияние протонного облучения и последующих изохронных отжигов на фотолюминесценцию легированных атомами цинка, теллура кристаллов p -GaAs. Показано, что протонное облучение приводит к появлению полосы излучения с максимумом вблизи 1.26 эВ и аномально большому (по сравнению с ожидаемым из радиационных изменений времени жизни избыточных электронов) уменьшению интенсивности краевого излучения с максимумом вблизи 1.5 эВ; отжиг облученных протонами кристаллов приводит, во-первых, к исчезновению излучения с максимумом вблизи 1.26 эВ и, во-вторых, к возгоранию, а затем гашению полос излучения с максимумами вблизи 1.39 и 1.18 эВ, а также к восстановлению первоначальной интенсивности краевой полосы люминесценции. Указанные изменения в спектрах люминесценции p -GaAs свидетельствуют о радиационно-стимулированном изменении структуры центров, формирующих в GaAs краевое излучение, вследствие ассоциации ими (а затем эмиссии) радиационных дефектов; об эффективном образовании при радиационном и радиационно-термических воздействиях пар As_iZn_{Ga} , $V_{As}Zn_{Ga}$ и $V_{Ga}Te_{As}$, характеризующихся относительно невысокой термической стабильностью.

Облучение арсенида галлия достаточно высокими потоками протонов $\Phi \geq \Phi^*$ (очевидно, величина Φ^* определяется исходными свойствами GaAs) приводит к существенному изменению его электропроводности [1], оптических свойств [1, 2], а также деградации светодиодов [3, 4] и фотопреобразователей [5-8] на его основе (указанное обусловлено достаточно высокой скоростью введения радиационных дефектов протонным облучением [1, 5, 6, 9]). Некоторые данные о влиянии облучения протонами на люминесценцию GaAs будут приведены далее.

Методика

Исходными для опытов являлись компенсированные (содержащие атомы Zn и Te, их концентрации $N_{Zn} \approx 2 \cdot 10^{17}$ и $N_{Te} \approx 1 \cdot 10^{17}$ см⁻³) и некомпенсированные (содержащие лишь атомы Zn, их концентрация $N_{Zn} \approx 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³, концентрация остаточных доноров в них меньше $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³) кристаллы p -GaAs [при 77 К концентрация равновесных дырок в них $p_0 \approx 2.5 \cdot 10^{16}$ и $4 \cdot 10^{17}$ см⁻³ соответственно, время жизни избыточных электронов $\tau_n(0) \approx 10^{-10}$ с, а их длина диффузии $l_d \approx 1$ мкм].

Облучение кристаллов протонами (энергия $E=0.2$ МэВ, длина пробега $l=1.8$ мкм, доза $\Phi \leq 2 \cdot 10^{12}$ см⁻²) проводилось при 20 °С. Изохронный (длительностью 30 мин) отжиг облученных (и контрольных необлученных) кристаллов p -GaAs проводился при $T \leq 650$ °С. Облучение и последующий отжиг мало изменяли величину p_0 [концентрация созданных облучением дефектов n_d (очевидно, $n_d \sim \Phi$) была значительно ниже концентрации атомов Zn и Te] и значительно уменьшали величины $\tau_n(l_d)$.

Люминесценция p -GaAs возбуждалась сильно поглощаемым (на глубине $1/k=0.25$ мкм) излучением He-Ne-лазера, интенсивность возбуждения $L = 10^{18}$ кв/см²·с; возбуждение мало изменяло величины p_0 и $\tau_n(l_d)$. Измерение спектров люминесценции p -GaAs проводилось при 77 К в области линейной зависимости интенсивности излучения I от L . В спектрах люминесценции исходных кристаллов p -GaAs наблюдалась лишь краевая полоса излучения

с энергией максимума $h\nu_m$ (77 К) вблизи 1.5 эВ, ее интенсивность $I_{1.5}(0)$ (рис. 1). Прогрев необлученных кристаллов p -GaAs мало изменял интенсивность краевой полосы излучения $I_{1.5}$ [$I_{1.5} \approx I_{1.5}(0)$ в необлученных отожженных кристаллах] и не приводил к появлению новых полос излучения в их спектре люминесценции (рис. 1).

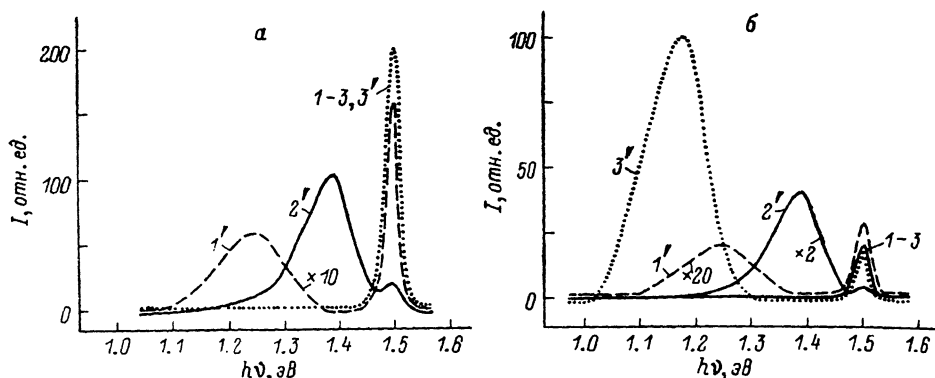


Рис. 1. Спектры люминесценции необлученных (1—3) и облученных потоком протонов $\Phi = 10^{12}$ см $^{-2}$ (1'—3') кристаллов p -GaAs<Zn> (а) и p -GaAs<Zn, Te> (б) при 77 К, непрогретых (1, 1') и прогретых 30 мин при 200 (2, 2') и 450 °С (3, 3').

Как в исходных, так и подверженных радиационно-термическому воздействию кристаллах p -GaAs интенсивность люминесценции была относительно невелика ($I \ll L$), т. е. доминировали процессы безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока (последние определяли величину τ_n).

Результаты

На рис. 1, 2 приведены данные, показывающие влияние протонного облучения и последующих отжигов на фотолюминесценцию p -арсенида галлия. В них обращают на себя внимание следующие нетривиальные закономерности.

а) Хотя, как и ожидалось, облучение кристаллов p -GaAs протонами значительно снижает интенсивность краевой полосы излучения $I_{1.5}$ и время жизни избыточных электронов τ_n , неожиданным явилась более сильная дозовая зависимость величины $I_{1.5}$ по сравнению с соответствующей для τ_n [при увеличении дозы Φ $I_{1.5}$ уменьшается сильнее, чем τ_n , т. е. $I_{1.5}(\Phi)/I_{1.5}(0) < < \tau_n(\Phi)/\tau_n(0)$ при $\Phi \geq \Phi^*$].

б) Облучение содержащих атомы цинка кристаллов p -GaAs протонами приводит к появлению в спектре люминесценции полосы излучения с положением максимума люминесценции $h\nu_m$ (77 К) вблизи 1.26 эВ (ее интенсивность $I_{1.26}$, полуширина $W=0.15$ эВ).

в) Протонное облучение и последующий отжиг при $T \geq 150$ °С содержащих атомы цинка кристаллов p -GaAs приводят к появлению в спектрах люминесценции полосы излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.39 эВ (ее интенсивность $I_{1.39}$ максимальна при $T \approx 200$ °С, полуширина $W=0.10$ эВ).

г) Протонное облучение и последующий отжиг при $T \geq 250$ °С содержащих атомы теллура кристаллов p -GaAs приводят к появлению в спектрах люминесценции полосы излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.18 эВ (ее интенсивность $I_{1.18}$ максимальна при $T \approx 450$ °С, полуширина $W=0.15$ эВ).

д) Отжиг облученных протонами кристаллов p -GaAs при повышенных и достаточно высоких температурах приводит к исчезновению стимулированных радиационным и радиационно-термическим воздействием полос излучения с $h\nu_m$ (77 К) вблизи 1.26, 1.39 и 1.18 эВ и значительному увеличению [практически до исходного значения $I(0)$] интенсивности краевой полосы излучения в нем, т. е. восстановлению первоначального вида спектра люминесценции p -арсенида галлия.

Приведенные выше данные об изменении при радиационном и радиационно-термическом воздействии интенсивностей излучения $I_{1.18}$, $I_{1.26}$, $I_{1.39}$ и $I_{1.5}$ могут быть объяснены следующим образом.¹

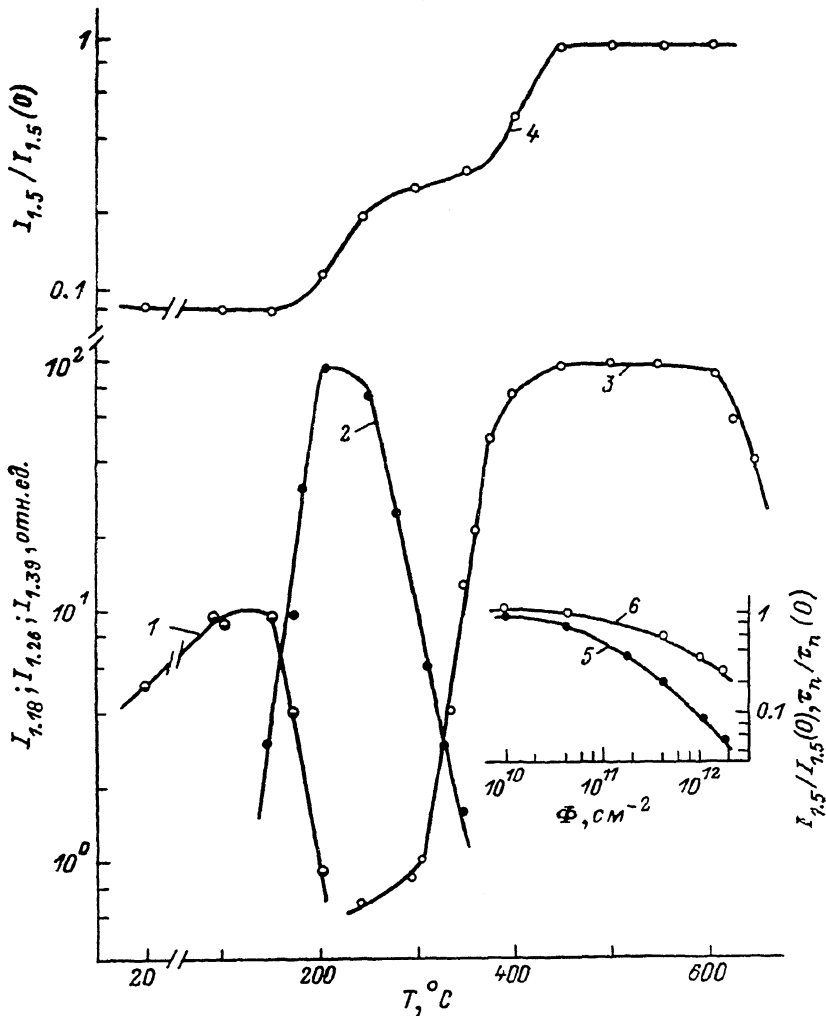


Рис. 2. Изменение интенсивностей излучения $I_{1.26}$ (1), $I_{1.39}$ (2), $I_{1.18}$ (3) и $I_{1.5}$ (4) при изохронном (30 мин) отжиге облученных протонами ($\Phi=10^{12}$ см⁻²) кристаллов $p\text{-GaAs}\langle\text{Zn}\rangle$ (1, 2, 4) и $p\text{-GaAs}\langle\text{Zn, Te}\rangle$ (3).

На вставке — дозовые зависимости интенсивности краевой полосы излучения $I_{1.5}$ (5) и времени жизни избыточных электронов τ_n (6) в кристаллах $p\text{-GaAs}\langle\text{Zn}\rangle$. Температура измерений 77 К (1—6). $I_{1.5} \approx I_{1.5}(0)$, а $I_{1.18} = I_{1.26} = I_{1.39} = 0$ в необлученных прогретых кристаллах.

а) Аномально большое (сильнее ожидаемого, если исходить из радиационных изменений) времени жизни электронов τ_n — уменьшение интенсивности крае-

¹ Последующая интерпретация полученных результатов основывается на хорошо известной природе центров, обуславливающих появление полос излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.18 , 1.26, 1.39 и 1.5 эВ, и надежно установленных данных о подвижностях радиационных дефектов в арсениде галлия (см. обзор [10]): а) в GaAs краевая полоса люминесценции обусловлена излучательной рекомбинацией свободных и связанных дырок, электронов на уровнях мелких доноров, акцепторов, а примесные полосы люминесценции с $h\nu_m$ (77 К) вблизи 1.18, 1.26 и 1.39 эВ — излучательными электронными переходами в созданных ближайшими соседями (вакансиями галлия V_{Ga} и мышьяка V_{As} , междоузельными атомами мышьяка As_i , атомами теллура на месте мышьяка Te_{As} и цинка на месте галлия Zn_{Ga}) парах $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$, $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$ и $V_{\text{As}}\text{Zn}_{\text{Ga}}$ соответственно [10]; б) в GaAs междоузельные атомы мышьяка подвижны даже при комнатной температуре, а вакансии мышьяка и галлия подвижны при $T \geq 150$ и 240 °С соответственно [10].

вой полосы излучения $I_{1.5}$ при возрастании дозы облучения p -GaAs протонами Φ обусловлено индуцированными радиацией разрушением (вытеснением из своего первоначального положения в решетке) «ростовых» центров люминесценции, формирующих «краевую» полосу излучения [10], а также уменьшением вероятности излучательных переходов в них вследствие усложнения их первоначальной структуры из-за ассоциации ими радиационных дефектов [10, 11] (очевидно, $I_{1.5}/I_{1.5}(0) = \tau_n/\tau_n(0)$, если изменения $I_{1.5}$ с Φ связаны лишь с тривиальным созданием при облучении центров безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока — изолированных вакансий мышьяка и галлия [10]).

б) Появление в спектре люминесценции облученных протонами содержащих атомы цинка кристаллов p -GaAs примесной полосы излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.26 эВ обусловлено захватом атомами Zn_{Ga} созданных радиацией (подвижных при $T \geq 20$ °С [10]) междоузельных атомов мышьяка As_i , т. е. образованием пар As_iZn_{Ga} .

в) Появление в спектрах люминесценции облученных протонами, а затем отожженных содержащих атомы цинка кристаллов p -GaAs примесной полосы излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.39 эВ обусловлено захватом атомами Zn_{Ga} созданных радиацией (подвижных при $T \geq 150$ °С [10]) вакансий мышьяка V_{As} , т. е. образованием пар $V_{As}Zn_{Ga}$.

г) Появление в спектрах люминесценции облученных протонами, а затем отожженных содержащих атомы теллура кристаллов p -GaAs примесной полосы излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.18 эВ обусловлено захватом атомами Te_{As} созданных радиацией (подвижных при $T \geq 240$ °С [10]) вакансий галлия V_{Ga} , т. е. образованием пар $V_{Ga}Te_{As}$.

д) Исчезновение при повышенных и достаточно высоких температурах отжига генерируемых протонным облучением полос излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.26 , 1.39 и 1.18 эВ обусловлено аннигиляцией (разрушением) созданных радиационным и радиационно-термическим воздействием пар As_iZn_{Ga} , $V_{As}Zn_{Ga}$ и $V_{Ga}Te_{As}$ ввиду, вероятнее всего, относительно слабой связи входящих в их состав компонентов (т. е. низкой термической стабильностью радиационно-стимулированных пар As_iZn_{Ga} , $V_{As}Zn_{Ga}$ и $V_{Ga}Te_{As}$), а восстановление при указанном термическом воздействии исходной интенсивности краевой полосы излучения (помимо тривиальной аннигиляции созданных облучением центров безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока) — восстановлением первоначальной структуры «ростовых» (создаваемых мелкими донорами, акцепторами) центров люминесценции, формирующих краевую полосу излучения, вследствие эмиссии ими радиационных дефектов [10].²

Очевидно, интенсивность обсуждаемых радиационно-стимулированных полос люминесценции с $h\nu_m$ (77 К) вблизи 1.26, 1.39 и 1.18 эВ (концентрации пар As_iZn_{Ga} , $V_{As}Zn_{Ga}$ и $V_{Ga}Te_{As}$) определяется дозой облучения Φ и концентрациями атомов цинка, теллура. Поэтому в идентично облученных (облученных и отожженных) кристаллах p -GaAs величины $I_{1.26}$ и $I_{1.39}$ тем выше, чем больше их легирование атомами цинка, а $I_{1.18} = 0$, если легирование арсенида галлия атомами теллура отсутствует (рис. 1).

В заключение отметим, что индуцированные протонным облучением, а также последующим отжигом нетривиальные изменения в спектрах люминесценции p -GaAs [аномальное уменьшение интенсивности краевой полосы излучения и появление полосы излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.26 эВ при радиационном воздействии, гашение последней и восстановление первоначальной интенсивности краевой полосы излучения при прогреве облученных кристаллов, появление, а затем исчезновение полос излучения с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.39 и 1.18 эВ при радиационно-термическом воздействии] обусловлены радиационно-стимулированными процессами генерации и аннигиляции пар As_iZn_{Ga} , $V_{As}Zn_{Ga}$ и $V_{Ga}Te_{As}$.

² Несомненно, центры люминесценции, ответственные за радиационно-стимулированное излучение с $h\nu_m$ (77 К) ≈ 1.18 (1.26, 1.39) эВ, включают в свой состав созданные радиацией дефекты структуры и атомы теллура (цинка), так как указанные полосы излучения наблюдаются лишь в облученных протонами кристаллах, а их интенсивность пропорциональна концентрации атомов теллура (цинка) (рис. 1).

а также разрушением и восстановлением «ростовых» (создаваемых мелкими донорами, акцепторами) центров люминесценции. Отмеченное свидетельствует об эффективном образовании при протонном облучении арсенида галлия рекомбинационно-активных дефектов в его как As-, так и Ga-подрешетках, одни из которых — As_i — подвижны при $T \geq 20$ °С, а иные — V_{As} , V_{Ga} — при $T \geq 150, 240$ °С, а также об относительно эффективном стоке указанных радиационных дефектов на атомы Zn и Те. Приведенные данные важны для понимания широко изучаемых в настоящее время процессов генерации, миграции и аннигиляции радиационных дефектов в интерметаллических полупроводниках [12].

Л и т е р а т у р а

- [1] Dymont J. C., North J. C., D'Asaro L. A. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 1. P. 207—213.
- [2] Oren M., Quinton A. R., Pencina C. M. // J. Electrochem. Soc. 1978. V. 125. N 5. P. 776—781.
- [3] Rose B. H., Barnes C. E. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 3. P. 1772—1780.
- [4] Hoofit G. W., Opdorp C. // Sol. St. Electron. 1984. V. 27. N 3. P. 253—259.
- [5] Li S. S., Wang W. L., Lai P. W. // 14 IEEE Photovolt. Spec. Conf. N. Y., 1980. P. 1080—1084.
- [6] Wang W. L., Li S. S. // 17 IEEE Photovolt. Spec. Conf. N. Y., 1984. P. 161—165.
- [7] Андреев В. М., Коган М. Б., Калиновский В. С. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 2. С. 121—125.
- [8] Андреев В. М., Гусинский Г. М., Калиновский В. С. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 8. С. 1391—1395.
- [9] Мамонтов А. П., Пешев В. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 10. С. 1771—1774.
- [10] Глинчук К. Д., Лукат К., Прохорович А. В. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. Киев, 1982. В. 1. С. 39—54.
- [11] Глинчук К. Д., Лукат К., Родионов В. Е. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 7. С. 1337—1342.
- [12] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 274 с.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получена 29.06.1988
Принята к печати 20.12.1988