

## О ПРИЧИНАХ РАЗЛИЧИЯ ДОЗОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОС ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ЧАСТИЦАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ $A^{III}B^V$

Е. В. Винник, К. Д. Глинчук, В. И. Гурошев, А. В. Прохорович

Институт полупроводников Академии наук Украины, 252650, Киев, Украина  
(Получена 30 ноября 1992 г. Принята к печати 26 января 1993 г.)

Проведен анализ причин, приводящих к различию дозовых зависимостей интенсивностей различных полос люминесценции в полупроводниках. На примере изучения зависимости интенсивности полос люминесценции с положением максимума излучения  $h\nu_m = 1.20$  и  $1.51$  эВ в кристаллах  $n$ -GaAs(Te) от дозы облучения быстрыми электронами показано, что это различие может быть действительно обусловлено не только радиационно-стимулированным изменением концентрации центров люминесценции, но и различием видов зависимостей интенсивности полос люминесценции от интенсивности возбуждения люминесценции. Отмеченное необходимо учитывать при определении из дозовых зависимостей интенсивности полос люминесценции радиационно-стимулированных изменений концентрации центров люминесценции.

*Введение.* При изучении влияния облучения быстрыми частицами на люминесценцию полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  GaAs [1–3], InP [4, 5], GaN [6], AlN [6],  $Al_xGa_{1-x}As$  [7],  $Ga_xIn_{1-x}P$  [8] и  $GaAs_{1-x}P_x$  [9] в их спектрах люминесценции замечено селективное понижение (ниже или выше ожидаемого понижения, обусловленного генерацией при отмеченном воздействии центров безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока) интенсивности отдельных полос люминесценции. Вследствие этого в указанных полупроводниках при вариации дозы облучения  $\Phi$  наблюдалось существенное различие дозовых зависимостей интенсивностей различных полос люминесценции  $I$ , т. е. их различная (повышенная или пониженная) стойкость относительно радиационного воздействия [1–9]. Наблюдаемая повышенная (пониженная) радиационная стойкость различных полос люминесценции обычно интерпретировалась как обусловленная радиационно-стимулированным повышением (понижением) концентрации одного из типов центров люминесценции  $N$ . Очевидно, радиационно-стимулированные изменения  $N$  могли быть обусловлены либо прямой генерацией при облучении центров люминесценции, аналогичных по своей природе «врожденным» центрам люминесценции, либо их созданием (разрушением) при взаимодействии радиационных дефектов с первичными дефектами.

В настоящей работе мы на примере изучения влияния облучения быстрыми электронами на фотолюминесценцию (ФЛ) кристаллов  $n$ -GaAs(Te) хотели бы обратить внимание на то, что отмеченное различие зависимостей  $I(\Phi)$  для различных полос люминесценции в полупроводниках не обязательно связано лишь с соответствующими изменениями величины  $N$ . Другой причиной может являться различие вида зависимостей интенсивности различных полос люминесценции от интенсивности возбуждения ФЛ  $L$  в области используемых  $L$ , что и приводит к различию их дозовых зависимостей. Однако ранее при интерпретации наблюдаемых дозовых зависимостей интенсивностей полос люминесценции этому обстоятельству обычно не уделялось должного внимания (не анализировались зависимости  $I$  от  $L$ , т. е. предполагалось, что наблюдаемое

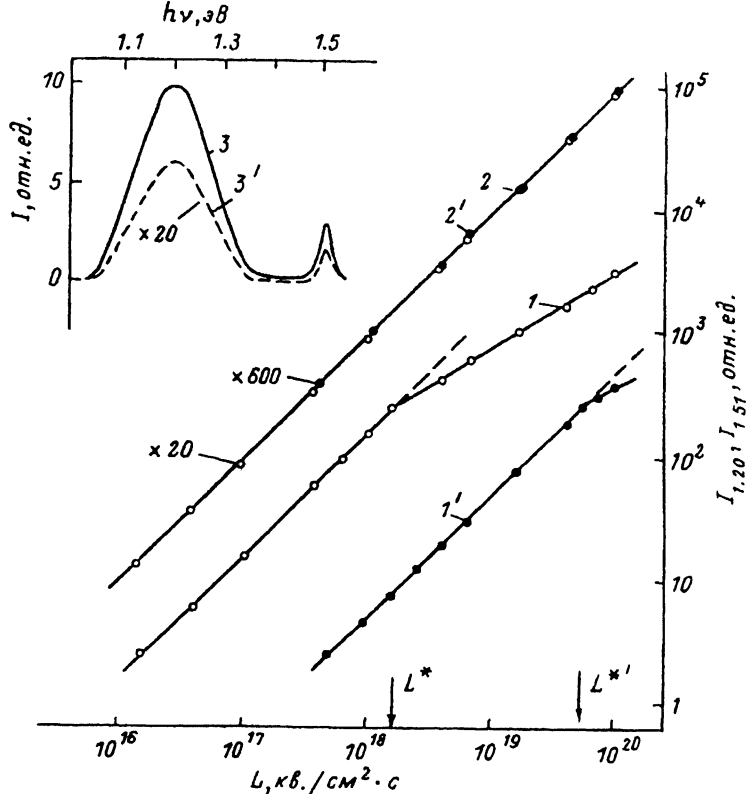


Рис. 1. Изменение интенсивностей «примесного»  $I_{1,20}$  (1, 1') и «краевого»  $I_{1,51}$  (2, 2') излучений при вариации интенсивности возбуждения ФЛ  $L$  в исходных (1, 2) и облученных потоком быстрых электронов  $\Phi = 3 \cdot 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup> (1', 2') и облученных потоком быстрых электронов  $\Phi = 3 \cdot 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup> (1', 2') кристаллах  $n$ -GaAs(Te). Температура измерения 77 К. Значение  $L^*$  показано для  $\Phi = 3 \times 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup>. На вставке приведены спектры ФЛ исходных (3) и облученных потоком быстрых электронов  $\Phi = 3 \cdot 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup> (3') кристаллов  $n$ -GaAs(Te). Измерения проводились при  $T = 77$  К и  $L = 1 \cdot 10^{18}$  кв/см<sup>2</sup> · с.

различие дозовых зависимостей различных полос люминесценции связано лишь с радиационно-стимулированным изменением концентрации центров люминесценции) [1–8]. Это, несомненно, могло приводить к определенному искажению (неточному определению) истинного вида зависимостей  $N(\Phi)$ .

### Методика исследований

Исходными для опытов являлись легированные атомами теллура кристаллы  $n$ -GaAs (концентрация равновесных электронов в них  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, а время жизни избыточных дырок  $\tau \approx 10^{-10}$  с). Облучение кристаллов быстрыми электронами (энергия электронов  $E = 2.2$  МэВ, интегральная доза облучения  $\Phi = 10^{15} - 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>), а также оптическое возбуждение мало изменяли их исходную проводимость.

ФЛ кристаллов  $n$ -GaAs(Te) возбуждалась излучением He—Ne-лазера (энергия квантов света 1.96 эВ, коэффициент поглощения света  $k = 4 \cdot 10^4$  см<sup>-1</sup>, интенсивность возбуждения  $L = 10^{16} - 10^{20}$  кв/см<sup>2</sup> · с). Измерения ФЛ проводились при  $T = 77$  К; ее спектральный состав регистрировался монохроматором МДР-23. В спектре ФЛ кристаллов  $n$ -GaAs(Te) наблюдались «примесное» излу-

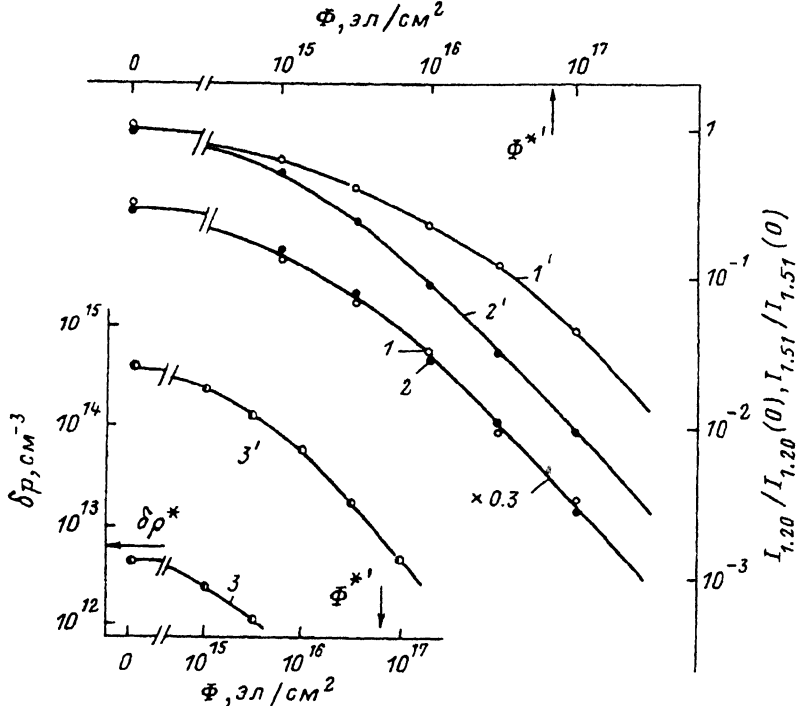


Рис. 2. Дозовые зависимости «приведенных» интенсивностей ФЛ  $I_{1.20}/I_{1.20}(0)$  (1, 1') и  $I_{1.51}/I_{1.51}(0)$  (2, 2'), а также концентраций избыточных дырок  $\delta p$  (3, 3') в облученных быстрыми электронами кристаллах  $n$ -GaAs(Te). Измерения проводились при  $T = 77$  К и  $L = 1 \cdot 10^{18}$  ( $1-3$ ),  $1 \times 10^{20}$  кв/см<sup>2</sup> · с ( $1'-3'$ ). Значение  $\Phi^*$  показано для  $L = 1 \cdot 10^{20}$  кв/см<sup>2</sup> · с.

чение (по форме близкое к гауссовому) с положением максимума люминесценции  $h\nu_m$  вблизи 1.20 эВ, его интенсивность  $I_{1.20} \ll L$  (оно обусловлено излучательной рекомбинацией электронов в донорно-акцепторных парах  $Y_{Ga}Te_{As}$  [10], их концентрация  $N_{1.20}$ ) и «краевое» излучение с положением максимума люминесценции  $h\nu_m$  вблизи 1.51 эВ, его интенсивность  $I_{1.51} \ll L$  (рис. 1).

Облучение приводило к существенному понижению концентрации избыточных дырок  $\delta p$ , что обусловлено значительным уменьшением времени жизни избыточных дырок  $\tau$  вследствие генерации при радиационном воздействии центров безызлучательной рекомбинации носителей тока; дозовая зависимость концентрации  $\delta p \approx kL\tau$  определялась из соответствующих изменений интенсивности  $I_{1.51}$ , очевидно,  $I_{1.51} \sim \delta p$  (рис. 2). При радиационном воздействии также значительно уменьшались интенсивности примесного  $I_{1.20}$  (очевидно,  $I_{1.20} \sim N_{1.20}\delta p$ ) и краевого  $I_{1.51}$  излучений [ $I_{1.20} = I_{1.20}(0)$ , а  $I_{1.51} = I_{1.51}(0)$  в исходных (при  $\Phi = 0$ ) кристаллах] (рис. 1).

В исходных кристаллах наблюдались линейное возрастание интенсивности примесного излучения  $I_{1.20}$  с ростом  $L$  при малых  $L$  ( $I_{1.20} \sim L$  при  $L \leq L^* \approx 1.25 \times 10^{18}$  кв/см<sup>2</sup> · с) и сублинейное — при больших  $L$  ( $I_{1.20} \sim L^{0.6}$  при  $L > L^*$ ), а также линейное возрастание интенсивности  $I_{1.51}$  с ростом  $L$  ( $I_{1.51} \sim L$ ) при любых  $L$  (рис. 1). Облучение быстрыми электронами (помимо значительного уменьшения интенсивностей  $I_{1.20}$  и  $I_{1.51}$ ) приводило к существенному расширению области линейной зависимости интенсивности  $I_{1.20}$  от  $L$ , т. е. смещению точки перегиба зависимости  $I_{1.20}(L)$  в сторону больших  $L$  (от значения  $L = L^*$  при  $\Phi = 0$  к значению  $L = L^{*'} > L^*$  при  $\Phi = 3 \cdot 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup>), не изменяя при этом наблюдае-

ную в исходных кристаллах линейную зависимость интенсивности «краевой» ФЛ  $I_{1.51}$  от интенсивности возбуждения (рис. 1).<sup>1</sup>

В исследуемых кристаллах при используемых  $L$  концентрация избыточных дырок  $\delta p$  линейно возрастала с ростом интенсивности возбуждения  $L$  ( $\delta p \sim L$ ); отмеченное следует из наблюдаемой на опыте зависимости  $I_{1.51} \sim L$  [т. е.  $\tau = \text{const}(L)$ ] (рис. 1). Следовательно, в исходных и облученных быстрыми электронами кристаллах интенсивности  $I_{1.20} \sim \delta p$  при  $\delta p \leq \delta p^* \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $I_{1.20} \sim \delta p^{0.6}$  при  $\delta p > \delta p^*$ , а  $I_{1.51} \sim \delta p$  при любых  $\delta p$  ( $\delta p \leq \delta p^*$  и  $\delta p > \delta p^*$ ).

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости интенсивностей полос ФЛ  $I_{1.20}$  и  $I_{1.51}$  от дозы облучения быстрыми электронами  $\Phi$ , измеренные при малых  $L$  ( $L < L^*$  и  $\delta p < \delta p^*$ ), им соответствуют линейная примесная ФЛ и краевая ФЛ ( $I_{1.20}, I_{1.51} \sim \delta p \sim L$ ; см. рис. 1), и больших  $L$  ( $L > L^*$  и  $\delta p > \delta p^*$ ), им соответствуют нелинейная примесная ФЛ ( $I_{1.20} \sim \delta p^{0.6} \sim L^{0.6}$ ; см. рис. 1) и линейная краевая ФЛ ( $I_{1.51} \sim \delta p \sim L$ ; см. рис. 1). Как видно, наблюдается совпадение дозовых зависимостей интенсивностей  $I_{1.20}$  и  $I_{1.51}$  [ $I_{1.20}/I_{1.51} = \text{const}(\Phi)$ ] в области линейности примесной и краевой ФЛ. В то же время обращает на себя внимание различие дозовых зависимостей интенсивностей  $I_{1.20}$  и  $I_{1.51}$  [ $I_{1.20}/I_{1.51} = \varphi(\Phi)$ ] в области нелинейной примесной ФЛ и линейной краевой ФЛ: наблюдается более высокая (по сравнению с краевым излучением) радиационная стойкость интенсивности примесного излучения —  $I_{1.20}(\Phi)/I_{1.20}(0) > I_{1.51}(\Phi)/I_{1.51}(0)$ . Очевидно, последнее обусловлено нелинейным (сублинейным) понижением интенсивности  $I_{1.20}$  при радиационно-стимулированном уменьшении  $\delta p$  (интенсивность  $I_{1.51}$  линейно понижается при уменьшении  $\delta p$ ).

Наблюдаемая повышенная радиационная стойкость интенсивности  $I_{1.20}$  в области сублинейности зависимости  $I_{1.20}(L)$  может ошибочно интерпретироваться как обусловленная радиационно-стимулированным возрастанием концентрации соответствующих центров люминесценции  $N_{1.20}$ . На самом деле  $N_{1.20} = \text{const}(\Phi)$ , как следует из совпадения дозовых зависимостей интенсивностей  $I_{1.20}$  и  $I_{1.51}$  в области линейной ФЛ, т. е. при  $L < L^*$  ( $\delta p < \delta p^*$ ).

Очевидно,  $I_{1.20}, I_{1.51} \sim L$  ( $\delta p \leq \delta p^*$ ) при  $L \leq L^*$  в необлученных ( $\Phi = 0$ ) кристаллах и при  $L \leq L^*$  ( $> L^*$ ) в облученных дозой  $\Phi \geq \Phi^*$  кристаллах (рис. 1, 2). Следовательно, если  $N_{1.20} = \text{const}(\Phi)$ , то дозовые зависимости интенсивностей  $I_{1.20}$  и  $I_{1.51}$  совпадают при  $L \leq L^*$  для любых  $\Phi$  и при  $L \leq L^*$  ( $L^* = \text{const} \Phi^* \geq L^*$ , если  $\tau \sim 1/\Phi$ , тогда  $I_{1.20}, I_{1.51} \sim \delta p \sim 1/\Phi$ ) для достаточно больших  $\Phi \geq \Phi^*$  (рис. 2).

**Заключение.** Различие дозовых зависимостей различных полос ФЛ в облученных быстрыми частицами полупроводниках при использовании для возбуждения ФЛ высоких интенсивностей возбуждения ( $L > L^*$ ) может быть обусловлено

<sup>1</sup> Радиационно-стимулированный сдвиг точки перегиба зависимости  $I_{1.20}$  от  $L$  (ее появление обусловлено существенным изменением заполнения (перезарядкой) центров люминесценции при больших концентрациях избыточных дырок  $\delta p \gg \delta p^*$  [11]) связан со значительным уменьшением при указанном воздействии величины  $\tau$ , т. е. величины  $\delta p$  ( $\Phi \approx kLx(\Phi)$ ). Вследствие этого в облученных кристаллах перезарядка центров люминесценции будет наступать при значениях  $K = L^* > L^*$ , достаточных при  $\Phi = \Phi^*$  для достижения величины  $\delta p \approx kL^* \tau \approx \delta p^* \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1.2). Очевидно,  $L^* = \varphi(\Phi)$ , а  $\Phi^* = \varphi(L)$ ; так,  $L^* = \text{const} \Phi^* \gg L^*$ , если  $\tau \sim 1/\Phi$  (рис. 1).

<sup>2</sup> Очевидно, обсуждаемый [связанный с нелинейностью зависимости  $I(L)$ ] эффект: а) максимален при больших  $L$  ( $L > L^*$ ) и несколько ослабевает при умеренных  $L$  ( $L^* < L < L^*$ ); б) в зависимости от вида (при используемых  $L$ ) зависимости  $I$  от  $L$  (а он весьма многообразен:  $I \sim L^\alpha$ , где  $0.5 \leq \alpha \leq 2$  [11–15]) может приводить как к повышению (если  $\alpha < 1$ ), так и к понижению (если  $\alpha > 1$ ) радиационной стойкости интенсивности полос люминесценции.

не только радиационно-стимулированным изменением концентрации центров люминесценции, но и различием зависимостей  $I(L)$  для них.<sup>2</sup> Для разграничения причин, приводящих к отмеченному различию зависимостей  $I(\Phi)$ , необходим предварительный анализ зависимостей  $I(L)$  в исходных и облученных кристаллах. В частности, для получения достоверных данных о появлении радиационно-стимулированных изменений концентрации центров люминесценции в полупроводниках необходимо изучение дозовых зависимостей интенсивностей линейной люминесценции  $[I \sim L (I \ll L)]$ .<sup>3</sup> Рассмотренное важно для правильной интерпретации наблюдаемых в полупроводниках дозовых зависимостей интенсивности различных полос ФЛ не только при радиационном воздействии, но и при иных внешних воздействиях — лазерном облучении, деформации, прогреве и имплантации (см., например, [16]).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Д. Ткачев, Д. С. Доманевский, В. М. Ломако, В. Ф. Стельмах. ФТП. 1, 986 (1967).
- [2] В. А. Зуев, Д. В. Корбутяк, В. Г. Литовченко. ФТП. 8, 1651 (1974).
- [3] С. Carlone, G. Bernier, E. Tappous. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-37, 1718 (1990).
- [4] Ф. П. Коршунов, С. И. Радауцан, Н. А. Соболев. ФТП. 23, 1581 (1989).
- [5] Ф. П. Коршунов, Радауцан С. И., Н. А. Соболев. ФТП, 24, 2034 (1990).
- [6] Е. Б. Соколов, Е. Ф. Уваров, А. П. Храпцов, В. П. Чегнов, М. В. Чукичев. ФТП, 16, 933 (1982).
- [7] В. А. Бржезинская, Е. С. Добрынина, М. В. Чукичев. Изв. АН СССР, сер. физ., 41, 991 (1977).
- [8] О. Н. Ермаков, В. П. Сушков, Е. Ф. Уваров, А. П. Храпцов, М. В. Чукичев. Электрон техн., сер. 2. Полупроводн. приборы, 4 (147), 3 (1981).
- [9] Г. А. Сукач, Н. И. Сыпко. ФТП, 24, 368 (1990).
- [10] К. Д. Глинчук, В. И. Гуров, А. В. Прохорович. ФТП. 25, 82 (1991).
- [11] K. D. Glinckuk, A. V. Prochorovich, V. E. Rodionov. Phys. St. Sol. A, 48, 593 (1978).
- [12] K. D. Glinckuk, A. V. Prochorovich, V. I. Vovnenko. Phys. St. Sol. A, 51, 645 (1979).
- [13] В. И. Вовненко, К. Д. Глинчук, А. В. Прохорович. ФТП, 9, 2032 (1975).
- [14] K. D. Glinchuk, A. V. Prochorovich, V. I. Vovneko. Phys. St. Sol. A, 54, 121 (1979).
- [15] T. Schmidt, K. Lischka, W. Zulehner. Phys. Rev. B, 45, 8989 (1992).
- [16] А. Байдуллаева, Б. М. Булах, Б. К. Даулетмуратов, Б. Р. Джумаев, Н. Е. Корсунская, П. Е. Мозоль, Г. Горядьев. ФТП, 26, 801 (1992).

Редактор В. В. Чалдышев

<sup>3</sup> Заметим, что линейная люминесценция может наблюдаться не только при низких  $L (\ll L^*)$ , но и при достаточно высоких  $L (\gg L^*, L^{**})$ , приводящих к появлению весьма больших (превышающих равновесные  $n_0, p_0$ ) концентраций избыточных электронов  $\delta n$  и дырок  $\delta p$  ( $\delta n \approx \delta p \gg n_0 + p_0$ ), и предельной перезарядке рекомбинационных центров (в том числе центров люминесценции) [11]. Поэтому об изменении  $N$  при вариации  $\Phi$  можно судить по зависимости  $I(L)$  при использовании не только низких  $L (\ll L^*)$ , но и достаточно высоких  $L (\gg L^*)$ .