

06.2;07;08

## **Деградационно-релаксационные явления в светоизлучающих $p-n$ -структурах на основе фосфида галлия, стимулированные ультразвуком**

© А.Н. Гонтарук, Д.В. Корбутяк, Е.В. Корбут,  
В.Ф. Мачулин, Я.М. Олих, В.П. Тартачник

Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев

Поступило в Редакцию 10 февраля 1998 г.

Исследованы процессы, происходящие в светодиодах фосфида галлия, подвергнутых ультразвуковой обработке. Обнаружено, что в поле ультразвуковой волны интенсивность свечения диодов монотонно уменьшается; после прекращения действия ультразвука наблюдается постепенное восстановление интенсивности излучательной рекомбинации. Деградационные явления возникают в результате разрушающего воздействия ультразвука на связанные экситоны и возникновения неравновесных при комнатной температуре дислокационных скоплений.

Распространение интенсивного ультразвука в кристалле сопровождается, как правило, изменением свойств полупроводника — фоточувствительности, электропроводимости, интенсивности излучательной рекомбинации, его шумовых характеристик [1–4]. Энергия ультразвуковой волны может быть использована также для целенаправленного улучшения параметров приборов полупроводниковой электроники — транзисторов, оптронов, гетеропереходов и др. [5–7].

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования явления постепенного уменьшения интенсивности свечения фосфидогаллиевого (GaP) светодиода, подвергнутого воздействию ультразвуковой волны, и монотонного возрастания яркости свечения прибора после выключения акустической нагрузки.

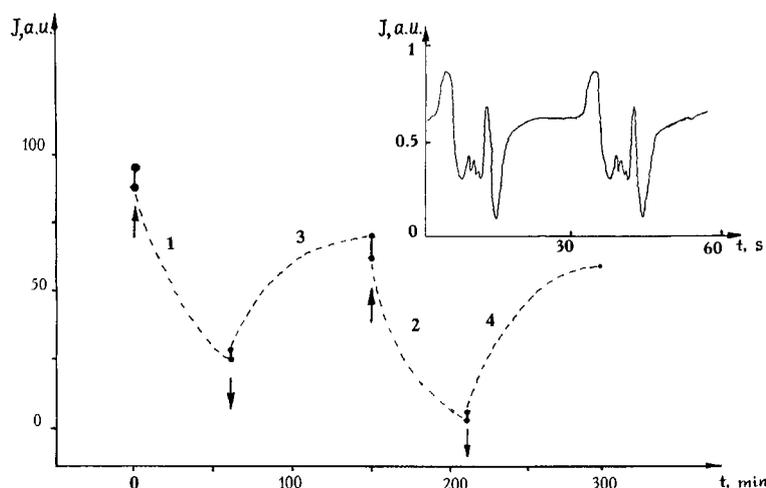
Использовались красные GaP-светодиоды (исходные и облученные  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$ ,  $\Phi = 10^7 - 10^9 \text{ rad}$ ), основная компонента излучения которых соответствовала рекомбинации экситона, связанного на паре Zn–O ( $h\nu = 1.8 \text{ eV}$ ). Ультразвуковая обработка производилась при

77 и 300 К. Мощность ультразвуковой волны на частотах 3–5 МГц составляла  $1 \text{ W/cm}^2$ . Изменялись спектральные характеристики яркости свечения диодов (в диапазоне  $600\text{--}850 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ), а также колебания интенсивности свечения при 77 К.

Обнаружено, что при включении ультразвука наблюдается мгновенное падение яркости свечения на 5–10% с одновременным возрастанием тока через  $p - n$ -переход. Характер изменений свидетельствует о разрушающем влиянии интенсивной ультразвуковой волны на экситонные поля в кристалле. Увеличение продолжительности ультразвуковой обработки приводит к дальнейшему, теперь уже медленному, падению интенсивности излучения светодиода (его деградации) при неизменном рабочем токе (рис. 1), что указывает на включение (проявление) иного механизма деградации яркости. Если время "озвучивания" было не особенно большим ( $< 1 \text{ h}$ ), то период восстановления свечения соизмерим со временем его гашения.

Применение последовательных деградационно-восстановительных циклов ультразвуковой обработки к светодиоду, содержащему радиационные нарушения структуры ( $\Phi = 10^9 \text{ rad}$ ), ведет к частичному восстановлению излучательной способности. Ультразвуковое воздействие на GaP-структуры в режиме обратного смещения, когда в спектре проявляется свечение микроплазм, уменьшает интенсивность их излучения. Существенной особенностью деградированных ультразвуком кристаллов является нестабильность свечения во всей спектральной области: на кривой  $I(\lambda)$  возникают отдельные узкие линии, успевающие изменить свое положение за время последующего измерения спектра (рис. 2). Такие локальные "вспышки" характерны только для светодиодов, "озвученных" сравнительно большой ультразвуковой дозой (несколько часов экспозиции).

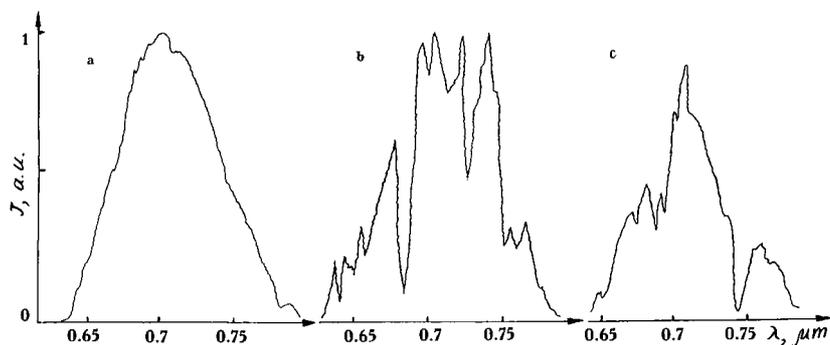
Одним из возможных механизмов, порождающих развитие деградационно-релаксационных явлений в рассматриваемом случае, может быть захват носителей на длинновременные ловушки [2]. Однако, как показали наши предварительные опыты, длительная ультразвуковая обработка холловских образцов GaP не приводила к заметным изменениям концентрации носителей тока. Поэтому, как упоминалось выше, причиной уменьшения интенсивности излучательной рекомбинации является распад связанных экситонов в поле ультразвуковой волны в результате вынужденных колебаний дислокаций. Последнее особенно отчетливо проявляется в момент включения ультразвука. При дальнейшей продолжительности ультразвуковой обработки преобладающим



**Рис. 1.** Зависимость интенсивности свечения светодиода GaP от времени озвучивания ( $f = 4.75$  MHz,  $W = 1$  W/cm<sup>2</sup>) для двух последовательных циклов ультразвуковой обработки. Кривые 1, 2 соответствуют деградации интенсивности электролюминесценции; 3, 4 — релаксации интенсивности свечения после прекращения действия ультразвука. Стрелками обозначены моменты включения ультразвука (стрелка вверх) и моменты выключения (стрелка вниз); Вставка: низкочастотные колебания свечения при 77 К.

эффектом становится разрушающее влияние дислокаций, приведенных в движение ультразвуковой волной и действующих как мощные поля безызлучательной рекомбинации. В образце, обработанном ультразвуком, на протяжении 30 min, их концентрация, подсчитанная согласно [8], становится близкой к  $\rho \approx 10^7$  см<sup>-2</sup>. При столь высокой плотности дислокаций возможно возникновение дислокационных сеток-скоплений, обнаруженных в работе [8] в виде дефектов "темных пятен" и "темных линий".

Подобные образования в фосфиде галлия при комнатной температуре достаточно подвижны и благодаря этой особенности процесс деградации после снятия ультразвуковой нагрузки сменяется релаксацией к исходному состоянию. При низких температурах (77 К) дислокационные скопления подобного рода образуют подвижные дислокационные пакеты, движущиеся по образцу с невысокой скоростью и являющиеся



**Рис. 2.** Спектральное распределение интенсивности электролюминесценции диода GaP: *a* — спектр излучения исходного образца; *b* — спектр образца, обработанного ультразвуком на протяжении 6 h в рабочем режиме (величина тока через *p-n*-переход составляла  $I = 20$  mA); *c* — спектр, записанный через 10 min после предыдущего измерения.

источниками колебаний тока и яркости свечения с частотой в несколько сотых Hz (рис. 1, вставка).

Узкие линии, носящие характер отдельных мерцаний, наблюдающиеся на спектральной зависимости свечения "озвученного" кристалла (рис. 2, *b*), напоминают описанные в литературе вспышки акустолюминесценции [2]. По всей видимости, при большой плотности дислокаций в образце, в нем существуют нестабильные области внутренних механических напряжений, способные служить источниками локального излучения.

"Улучшающее" влияние ультразвуковой волны на облученные приборы и на интенсивность свечения микроплазм в значительной степени обусловлено гетерирующим действием подвижных дислокаций. Действительно, дислокации, являясь эффективным стоком для простейших нарушений структуры [8–10], перемещаясь по кристаллу, способны поглощать точечные дефекты, как исходные, так и возникшие в результате облучения.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что акустическая волна в кристаллах GaP оказывает разрушающее влияние на связанные экситоны.

Под влиянием ультразвуковой обработки в фосфиде галлия возникают термодинамические неравновесные при комнатной температуре скопления дислокаций типа дефектов темных пятен, уменьшающие интенсивность электролюминесценции. Восстановление свечения прибора происходит на протяжении нескольких десятков минут после прекращения ультразвуковой обработки диода. На протяжении времени релаксации в спектре свечения возникают короткоживущие узкие линии излучения, обусловленные существованием нестабильных зон механических напряжений, созданных предварительно ультразвуковой обработкой.

Подвижные дислокации проявляют гетерирующее действие по отношению к точечным дефектам радиационного происхождения и продуктам распада сложных нарушений.

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда фундаментальных исследований Украины, проект № 2.5.1/55.

## Список литературы

- [1] *Здебский А.П., Миронюк Н.В., Остапенко С.С.* и др. // ФТП. 1986. Т. 10. В. 10. С. 1861–1867.
- [2] *Островский И.В.* Акустолюминесценция и дефекты кристаллов. Киев: Вища школа, 1993. С. 223.
- [3] *Здебский А.П., Шейнкман М.К., Анниязов А.Н.* и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 4, С. 1135–1140.
- [4] *Олих Я.М., Шавлюк Ю.Н.* // ФТТ. 1996. Т. 38. № 11. С. 3365–3371.
- [5] *Здебский А.П., Корчная В.Л., Торчинская Т.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 2. С. 76–81.
- [6] *Браиловский Е.Ю., Здебский А.П., Семенова Г.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 21. В. 4. С. 80–84.
- [7] *Браиловский Е.Ю.* Радиационное дефектообразование в широкозонных полупроводниках и гетероструктурах на их основе. Автореф. докт. дис. Киев, 1986. 276 с.
- [8] *Brantley W.A., Lorimer O.I., Darkus P.D.* et al. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 6. P. 2629–2637.
- [9] *Локтев В.М., Халак Ю.М.* // УФЖ. 1997. Т. 42. В. 3. С. 343–352.
- [10] *Вернидуб Р.М., Олих Я.М., Тартачник В.П.* и др. // УФЖ. 1995. Т. 40. В. 8. С. 886–890.