



ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ Р – N - ПЕРЕХОДА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ В ПРОЦЕССЕ ДЕГРАДАЦИИ

Абдуллаев Ж.С.^{1[0009-0003-5032-9031]}, **Бакиров Э.В.**^{2[0009-0000-2303-9707]},
Жамолиддинов Ж.^{3[0009-0004-3292-327X]}

¹Доцент Ферганского государственного технического университета,
E-mail: abdullaevjamoliddin@gmail.com

²Докторант Ферганского государственного технического университета,
E-mail: eldorbekbakirov97@gmail.com

³Студент Ферганского государственного технического университета,
E-mail: jovajova746@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada yarim o'tkazgichli birikmalarning taqiqlangan zonasidagi chuqur sathlar(o'ralar) spektrining degradatsiya jarayonidagi o'zgarishlarini o'rganish natijalari keltirilgan. Yorug'lik chiqaruvchi diodlar (SD) optoelektronikada keng qo'llanilmoqda. Shu munosabat bilan SD degradatsiyasi jarayonini, ya'ni ekspluatatsiya davomida ularning parametrlarining o'zgarishini o'rganish elementar jarayonlarning fizik tabiatini hamda ularni keltirib chiqaruvchi mexanizmlarni aniqlash, shuningdek, qurilmalarning ishonchliligini oshirish nuqtai nazaridan dolzarb vazifa hisoblanadi. Ishda suyuq fazali epitaksiya usuli bilan olingan geterostrukturalar asosidagi svetodiodlar degradatsiyasi jarayonini tadqiq etish natijalari keltirilgan. Degradatsiya hodisasini o'rganishda 77–300 OK harorat oralig'ida elektroluminessensiya spektrlari, volt-farad va volt-ampere xarakteristikalarini klassik usullar bilan o'rganish bilan birga zamonaviy yuqori informativ metodlardan ham foydalanildi.

Kalit so'zlar: yorug'lik chiqaruvchi diodlar(LED), relaksatsiya, fotoluminestsensiya, elektroluminestsensiya, termostimulyatsiya toki, termostimulyatsiya sig'imi, spektroskopiya, chuqur markazlar.

Аннотация: В статье представлены результаты изучения изменений спектра глубоких уровней (ям) в запрещенной зоне полупроводниковых соединений в процессе деградации. Светоизлучающие диоды (СД) широко применяются в оптоэлектронике. В связи с этим изучение процесса деградации СД, то есть изменения их параметров в процессе эксплуатации, является актуальной задачей с точки зрения определения физической природы элементарных процессов и механизмов, вызывающих их, а также повышения надежности устройств. В работе представлены результаты исследования процесса деградации светодиодов на основе гетероструктур, полученных методом жидкофазной эпитаксии. При изучении явления деградации в диапазоне температур 77-300 ОК наряду с изучением спектров электролюминесценции, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик классическими методами были использованы современные высокоинформативные методы.

Ключевые слова: светодиоды (LED), релаксация, фотолюминесценция, электролюминесценция, ток термостимуляции, ёмкость термостимуляции, спектроскопия, глубокие центры.

Abstract: The article presents the results of studying the changes in the spectrum of deep levels (s) in the forbidden zone of semiconductor compounds during degradation. Light-emitting diodes (LDs) are widely used in optoelectronics. In this regard, studying the degradation process of SDs, i.e., changes in their parameters during operation, is a pressing task in terms of determining the physical nature of the elementary processes and mechanisms that cause them, as well as increasing the reliability of devices. The work presents the results of researching the degradation process of LEDs based on heterostructures obtained by the liquid-phase epitaxy method. In studying the degradation phenomenon in the temperature range of 77-300 OK, along with the study of the electroluminescence spectra, volt-farad and volt-ampere characteristics using classical methods, modern highly informative methods were used.

Keywords: LEDs, relaxation, photoluminescence, electroluminescence, thermostimulation current, thermostimulation capacitance, spectroscopy, deep centers.



Введение

Глубокие центры, включающие примеси с глубоко расположенными энергетическими уровнями, радиационные дефекты и дефекты, возникающие в результате термообработки, оказывают существенное влияние на характеристики полупроводниковых материалов и устройств. В некоторых случаях их присутствие может улучшить, а в других – ухудшить свойства полупроводников. Исследование этих центров, как положительных, так и отрицательных, представляет собой ключевое направление в современной физике полупроводников.

Изучение энергетического спектра глубоких энергетических уровней в зоне активации СД при его разрушении получило толчок благодаря появлению новых исследовательских методик. Среди них выделяют метод термостимулированного тока и термостимулированной емкости, туннельную спектроскопию и релаксационную спектроскопию глубоких уровней (часто называемую DLTS).

Обзор литературы

Емкостная спектроскопия дефектов в полупроводниках основана на изменении емкости раздела р-п под воздействием концентрации электронов или дырок в этих дефектах. Этот метод отличается высокой восприимчивостью к дефектам и позволяет анализировать их свойства независимо от типа преобладающих носителей заряда.

Об увеличении плотности центров быстрой рекомбинации (ЦБР) в процессе деградации светодиодов свидетельствуют такие экспериментальные признаки, как возрастание рекомбинационной и избыточной составляющих прямого тока [2–7], рост величины обратного тока [6], усиление низкочастотных токовых шумов [7], а также уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда и соответствующее сокращение их диффузионной длины. Кроме того, в деградирующих структурах наблюдается повышение порога генерации лазерных излучателей.

Детальные исследования эволюции энергетического спектра локальных уровней в активной области светодиодов, выполненные с использованием методов термостимулированных токов и переходной ёмкостной спектроскопии глубоких центров [8–10], показали, что в ходе деградации формируется целый набор локализованных состояний. При этом для части выявленных центров пока не установлена однозначная связь между их возникновением и степенью деградации прибора.

Так, например, при деградации устройств на основе твёрдого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ примерно на 50 % наблюдалось появление ловушек с концентрацией порядка $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в интервале энергий 0,2–0,4 эВ от обеих зон. В работе [10] также зафиксировано формирование аналогичных центров при деградации структур типа р⁺–п на основе

$\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ приборов двух эффективных рекомбинационных центров $E_1 = 0,4 \text{ эВ}$, $G_b(E_1) = 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, и $E_2 = 0,74 \text{ эВ}$, $G_b(E_2) > 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и одну дырочную ловушку с энергией 0,24 эВ, однако корреляция между плотностью этих центров и деградацией не была установлена. В то же время известно, что при деградации GaP:Zn:0 светодиодов (СД) обнаружено четыре типа ловушек для неосновных носителей до деградации и, по крайней мере, два типа ловушек для основных носителей после деградации (0,55 и 0,76 эВ с концентрацией 10^{15} см^{-3}), появление которых коррелировано с эффективностью деградации (рис- 1).

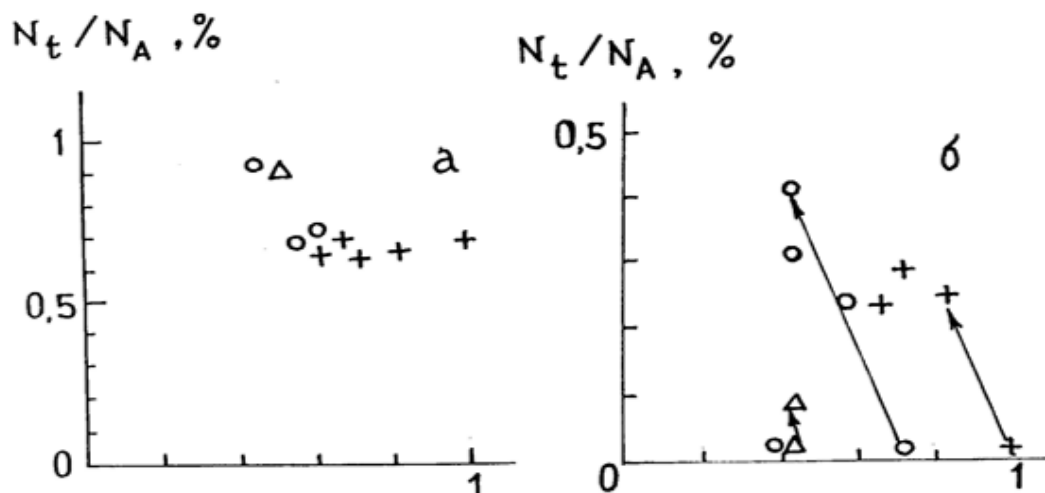


Рис.1. Изменения концентрации кислорода (а) и некоторого Т – центра (б) в зависимости от изменения эффективности излучения. СД.

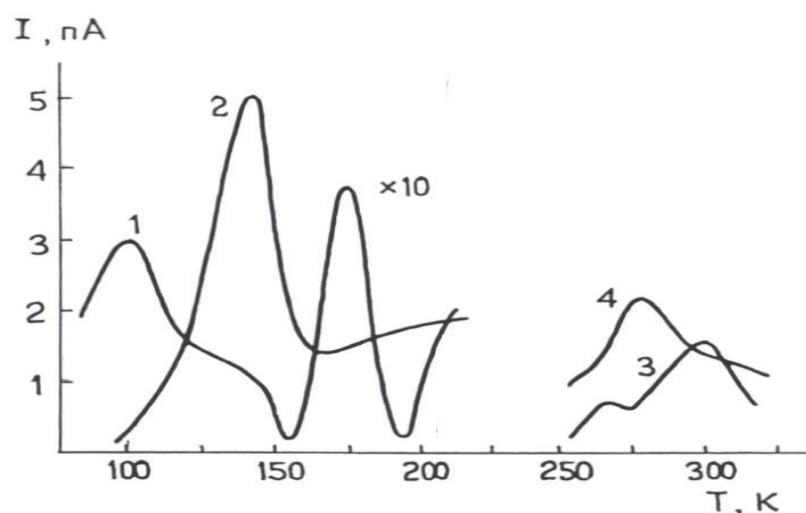


Рис.2. Спектры ТСТ р - n – перехода на основе GaAs_{1-x}P_x до (1,3) и после (2,4) деградации при скоростях нагрева 0,55 (1,2) и 0,07 (3,4). (к·с-1).

На рис -2 приведены кривые термостимулированного тока СД на основе Ga Al_{1-x}P_x, полученного диффузией Zn в материал n – типа, легированный Те [11]. Сопоставив кривые (рис -2.) до и после деградации (100ч) можно увидеть, что концентрация одних уровней в области пространственного заряда (ОПЗ) увеличилась, а других уменьшилась.

Исследователи [8] также установили, что при ухудшении характеристик светоизлучающего диода количество глубоких дефектов в области р-п перехода способно изменяться в обе стороны. Для проведения измерений методом температурного сканирования образец охлаждали до температуры жидкого азота под воздействием прямого тока высокой интенсивности (10 А/см²). Далее подавалось обратное напряжение в 3 В, после чего образец удерживался при этой температуре (80 OK) в течение 5 минут и затем плавно нагревался со скоростью от 0,07 до 0,6 градусов Цельсия в секунду. Изменения тока в зависимости от температуры регистрировали во время нагрева с использованием электрометрического оборудования и специализированного устройства для записи данных. После возвращения к исходной температуре, повторного охлаждения и



стабилизации при 800К проводился второй цикл нагрева с тем же обратным напряжением в 3В. Оценка метода ТСТ основывалась на сравнении значений тока, полученных в ходе обоих циклов нагрева.

Использованные методы

При определении параметров примесных центров исходили из того, что повторное захватывание примесей не происходит и толщина выведенного слоя остается постоянной во время высвобождения их из ловушек. Это второе условие было проверено путем наблюдения за стабильностью емкости р-п переходов при заполнении и последующем опустошении ловушек. Положение энергетических уровней дефектов устанавливалось через анализ смещения положений термодинамических максимумов в зависимости от скорости изменения температуры. В таблице 1.1 представлены значения энергии ионизации некоторых центров, концентрация которых изменялась при деградации СД.

Таблица 1.1.

Энергия ионизации центров, концентрация которых изменяется при деградации СД (I – Evt, эВ, II - метод).

Ga As		Ga _{1-x} Al _x As	
I	II	I	II
		0,08	ТСТ
0,17	ТСТ		
0,18	ТС		
0,23	ТСТ	0,21	
	ТС	0,24	ТСТ
0,27	ТСТ	0,31	
0,44*		0,45	ТС
0,43	ТСТ	0,49*	ТСТ
0,45	ТС		
0,439			
0,55	ТС	0,6	ТС
0,52		0,6*	ТСТ
0,54*			
0,76		0,89	

* Обнаружены в свежес制备ленных структурах.

Изменение параметров глубоких центров в AlGaAs СД в условиях рекомбинации значительных концентраций электронов и дырок зарегистрировано в работах [13-15,19-22]. В [13] обнаружено, на основании анализа туннельных компонент прямого и обратного токов изменение концентрации двух ловушек Et = 0,45 и 0,6 эВ. В [16] методом DLTS зарегистрировано возрастание концентрации ловушек с Et = 0.89 эВ в процессе быстрой (t=100ч) деградации Al Ga As лазеров.

Согласно исследованию, представленному в работе [17], кремниевые полупроводники на основе арсенида галлия (GaAs:Si) изначально содержат дефекты с энергией ионизации 0,1 эВ и высокой концентрацией, достигающей (1,87

$\pm 4,14 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$). В результате намеренного ухудшения образцов при температуре 100°C в течение 1500 секунд, количество данных дефектов уменьшилось в три раза.

Было установлено наличие нескольких глубоких энергетических уровней в структурах из арсенида галлия и фосфида галлия. Так, в фосфиде галлия определен уровень энергии $E_v + 0,55 \text{ эВ}$, а в арсенидных структурах – акцепторный уровень с энергией ионизации в диапазоне от 0,43 до 0,45 эВ, связанный с присутствием кремния. Кроме того, уровень $E_v + 0,22 \text{ эВ}$ в фосфидной структуре и два уровня с энергиями ионизации $E_v + 0,08$ и $E_v + 0,17 \text{ эВ}$, формирующиеся при ухудшении характеристик арсенидных структур, вероятно, также связаны с внедрением атомов кремния. Однако значительная часть дефектов как в фосфидных, так и в арсенидных структурах осталась невыявленной [6-8]. При этом следует подчеркнуть, что новые глубокие уровни не всегда проявляются после деградации полупроводников; например, в исследовании [18] существенные изменения энергетической структуры активной области легированной азотом фосфидной структуры не зафиксированы. Данные расхождения могут быть вызваны различием условий воздействия на полупроводники в процессе их деградации и использованием различных технологий производства полупроводниковых структур.

В [13,16] параметры глубоких центров измерялись в начальный и конечный моменты времени наработки. Однако кинетика деградации красных AlGaAs СД сложна и обусловлена протеканием нескольких элементарных процессов. Было целесообразно поэтому проследить за изменением спектра глубоких уровней с меньшими временными интервалами, с использованием современных методов исследования, а также в связи с одновременным излучением изменений феноменологических характеристик диодов. В результате удалось установить корреляцию между характером изменения феноменологических параметров и появлением определенных типов глубоких центров.

Экспериментальные результаты и их анализ.

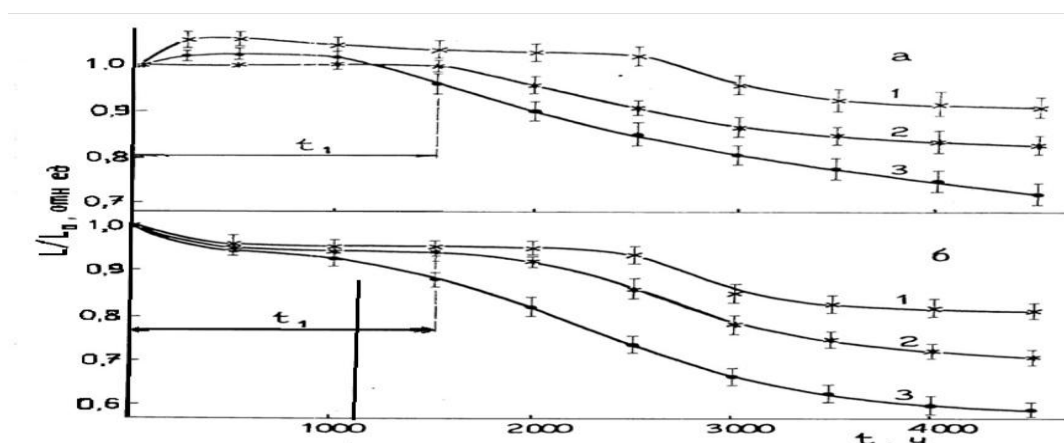


Рис.3. Кинетика относительного изменения средних значений мощности излучения красных $GsxAl1-xAs$ СД.

Деградации происходила при пропускании через диоды прямого тока с плотностью $I = 16 \text{ А/см}^2$ при температуре 500°C в течение 3000 часов. На различных этапах деградации контролировались интегральная эффективность свечения, спектры электролюминесценции (ЭЛ), ватт-вольт-амперы, вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики (ВАХ и ВФХ), а также параметры глубоких центров в

активной области СД. Последние измерялись методом релаксационной емкостной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) (DLTS).

Изученные образцы СД демонстрировали эмиссию в двух диапазонах длин волн: красном (К) с энергией фотонов 1.82 эВ (полуширина 0,06 эВ) и инфракрасном (ИК) с энергиями 1.39–1.40 эВ (полуширина 0,07 эВ). Данные полосы спектра возбуждались рекомбинацией электронов и дырок в неэквilibриуме, возникающей в слое $p\text{-Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$ и подложке из GaAs, вследствие поглощения основной красной полосы в подложке (см. рис. 4). Инфракрасная полоса с энергией 1.40 эВ коррелирует с областью перехода между слоями AlGaAs и GaAs, тогда как полоса при энергии 1.39 эВ отражает излучение от легированной подложки из GaAs.

Кинетика относительного изменения средних значений мощности излучения СД в партиях представлена на рис -3. Все исследованные СД можно было разделить на две группы. В первой группе на начальном участке деградации (0÷500 ч) среднее значение мощности излучения P не изменяется или даже возрастает (рис -3а). Во второй группе в этот период наблюдается снижение P (рис -3б). Далее в течение некоторого периода времени t_1 мощность излучения P диодов обеих групп практически не изменяется, а затем происходит ее монотонное снижение.

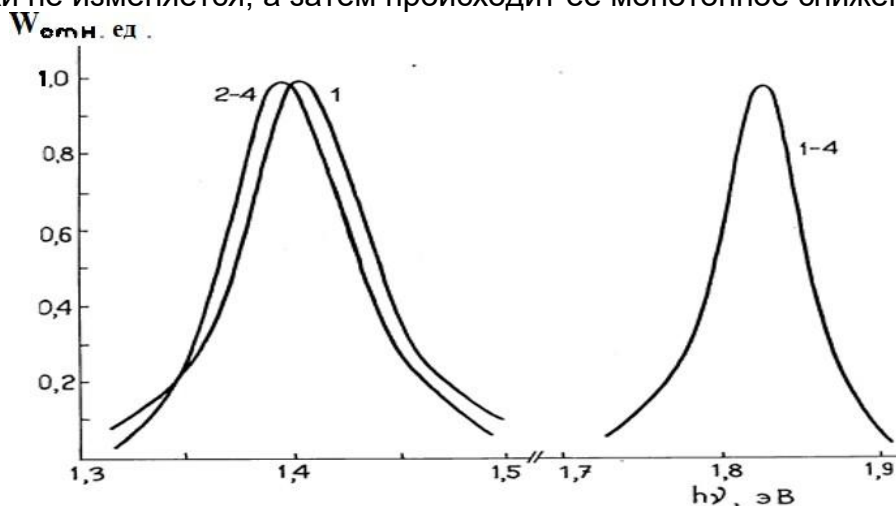


Рис - 4. Спектр электролюминесценции красных СД в моменты времени наработки: 0 (1), 100 (2), 500 (3) и 6000 (4). (т)

Изменение величины W на начальном участке деградации сопровождается ростом избыточного тока на прямой и обратной ветвях ВАХ, снижением интенсивности ИК полосы свечения и смещением ее в низкоэнергетическую область спектра: $h\nu$, в т смещается с 1,40 к 1,39 эВ (рис -4).

Длительность периода t_1 зависит от температуры p - n – перехода T_{p-n} и тока через диод I_d . Уменьшение длительности t_1 с ростом T_{p-n} происходит по экспоненциальному закону с энергией активации процесса $E_a = 0,4$ эВ. В течение периода t_1 происходит уменьшение последовательного сопротивления R_n , а в некоторых СД – снижение напряжения пробоя $U_{проб}$ и рост ёмкости диодов.

В дальнейшем ($t > 500$ ч) монотонное снижение величины P происходит некоторое время без изменения тока на прямой и обратной ветвях ВАХ, при постоянных R_n и $I_{пр}$, а затем одновременно с уменьшением P вновь начинает расти избыточный ток на ВАХ.

В отличие от известной установки в целях повышения точности измерения сечений захвата постоянная времени экспоненциальных импульсов устанавливалась равной $0,56t_0$, где t_0 – длительность прямоугольного импульса обратного смещения. Для измерений был использован тест-сигнал в частотой 4 МГц и

амплитудой 150 мВ. На исследуемых образцах средняя чувствительность измерительного тракта составляла 10^{-4} от концентрации низко компенсированной мелкой легирующей примеси. Перезарядка глубоких центров исследовались для постоянных времени T из диапазонов $4,3 \cdot 10^{-5} \div 7,3 \cdot 10^{-3}$ с. Длительность заполняющего и инжектирующего импульса составляли $0,2 T$, а максимальный инжектирующий ток достигал 30 мА.

В процессе изучения параметров ГУ кроме метода релаксационной ёмкостной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) использовали и метод инжекционной спектроскопии локальных центров.

В процессе деградации преобразование спектра глубоких уровней в активном слое красных AlGaAs СД происходит, главным образом, в более поздний период наработки (750 – 2000 ч) и не сопровождается изменением величины токов через $p-n$ переход. Снижение силы света СД при этом обусловлена уменьшением объемной квантовой эффективности свечения активного слоя. Как следует из спектра DLTS и данных инжекционной спектроскопии в этот период в активной области диодов происходит уменьшение концентрации более мелких ловушек ($E_v + 0.20$, $E_v + 0.26$ и $E_v + 0.32$ эВ) и рост числа глубоких центров рекомбинации ($E_v + 0.55$, $E_v + 0.60$ и $E_v + 0.67$ эВ). При этом плотность состояний области широкого плоского максимума $S\varepsilon$ (рис -5.) практически не изменяется.

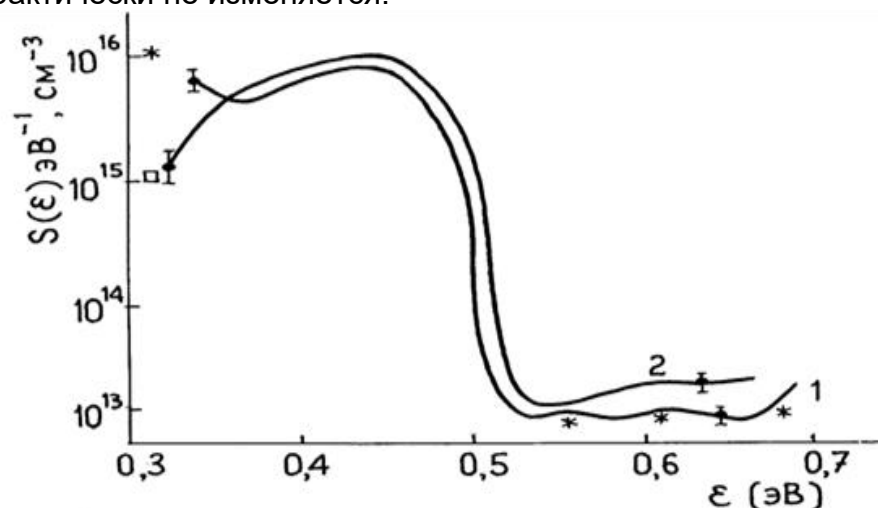


Рис - 5. Распределение плотности локальных состояний по энергии в ОПЗ исследованных СД до (1) и после (2) деградации в течении 1500 ч; и \cdot - параметры ловушек, оцененные по спектру DLTS, до и после деградации, соответственно.

Таким образом, использованные методики оценки параметров глубоких центров оказались взаимно дополняющими друг друга в области резких распределений $S\varepsilon$ (типа б – функции). В области непрерывного распределения $S\varepsilon$, как нам представляется, метод инжекционной спектроскопии является более информативным.

Выводы

1. Показано, что явление деградации Al_xGa_{1-x}As (x=0,34) СД, светоизлучающие структуры которых содержит Ga As подложку, обусловлено релаксацией упругих



напряжений в AlGaAs – GaAs гетероструктуре и диффузией атомов Zn из GaAs подложки к p-n переходу.

2. Выяснена природа и определены параметры глубоких центров, преобразующихся при деградации Al_xGa_{1-x}As (x=0,34) СД. Установлены глубокие центры, появление которых вызывает снижение объемной квантовой эффективности свечения активного слоя и уменьшение мощности излучения СД.

Список использованной литературы:

- [1]. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках М.: Мир б 1977ю – 564 с.
- [2]. Птащенко А.А., Сушков В.П., Литовченко Л.Ф и др. Исследование механизмов деградации светодиодов на основе Ga As_{1-x} Px и G_{1-x} Alx As при низких уровня инжекции // Электронная техника Сер 2. Полупроводниковые приборы. – 1976. - №8 – с 41-54.
- [3]. Евстронов В.В., Коган А.М., Трушина В.Е., Щаренков Б.В. Об изменении концентрации рекомбинационных центров в результате длительного протекания инжекционного тока через p-n структуру. – ФТП – 1971 – 5, №7 – с 1454-1457.
- [4]. Ralston T.M, Lorimor O.G, Dagradaion of bulk electroluminescent efficiency in Zn, o doped GaP LED's // Proc Soc Inform Display – 1977 v18, N2, p 186-188.
- [5]. Shinoda T., Kumakami T. Rapid degradation in Ga As – Al Ga As lasers Caused by process induced defects // Tap T appl Phys – 1977 – V16, N7, - p 1271- 1272.
- [6]. Птащенко А.А и др Электронная техника – 1973 №3 – с 7-44.
- [7]. Лукьянчикова Н.Б. Гарбар Н.М., Шейнкман М.К избыточные токи и шумы прямосмещенных Ga P диодов – ФТП – 1972 - 6, №5 – с 869-877.
- [8]. Птащенко А.А., Литовченко Л.Ф и др. Движение примесных центров при комнатной температуре в p-n переходах на основе Ga As, Ga_{1-x} Alx As, Ga As_{1-x} Px // УФЖ – 1978 – т 23, №1 – с 100-128.
- [9]. Hamilton B., Peaker A.B., Bramwell S., Harding W., Wight D.R Deep-level controlled litetine and luminescence efficiency in GaP // appl phys Lett – 1975 – v 26, N12, p 702-704.
- [10]. Tell B., van Opdorp C. Capacitance spectroscopy of degraded GaAs P light emitting diodes // T. Appl phys – 1978 – v49, N5 – p 2874-2947.
- [11]. Gold R.O., Weisberg L.R Permanent degradation of Ga As tunnel diodes. // Sol stat elect – 1964 – V7, N4, p 811821.
- [12]. Воеводин В.Г. и др. Теория ТСТ в p+-n переходе с глубокими ловушками в области объемного заряда // ФТП – 1973 – 7, №4. С 741-745.
- [13]. Птащенко А.А., Литовченко Л.Ф., Теплаков В.А., Баранов В.М. Движение примесных центров при комнатной температуре в p-n переходах на основе Ga As, Alx Ga_{1-x} As, Ga As_{1-x} Px // УФЖ – 1978 т 26, №1 – с 100-108.
- [14]. Lang D.V Deep level transient spectroscopy. A new method to charactevize traps in semiconducters // T. appl phys – 1974 – v 45, N7 – p 3023- 3031.
- [15]. Ж.С.Абдуллаев, М.Ю.Гусев, А.Н.Зюганов, Т.В.Торчинская. Параметры глубоких центров в светодиодах AlGaAs, оценённые методами ёмкостной и инжекционной спектроскопии. // Укр.физ.журнал 34(8), 1220- 1224.
- [16]. Lang D.V, Hartman R.L, Schumaker N.E Capacitance spectroscopy studies of degraded Alx Ga_{1-x} As DH stripe geometry lasers // T appl phys – 1976-v 47, N 11 – p 4986-4992.



- [17]. Fait J. Machal P., Myslik V. The development of deep levels in Ga As: Si LED's during again // Reliab Electr and Electron Compon and Syst S. Eur Cont Electrotechn., EUROCON 82, Capenghagen, June 14-18, Preps. Pt. I, Amsterdam, e.a -1982 – p 327-332.
- [18]. Schairer W. Defect centers and degradation of GaP:N LED's // I of electronic materials – 1979 – v8 N2 – p 139-150.
- [19]. Кравченко А.Ф., Принц В.Я. Емкостная спектроскопия примесных и дефектных уровней в полупроводниках типа АШВУ.- Новосибирск 1979 – 41 с – Припринт Институт физики полупроводников АН СССР, №35 – 73.
- [20]. Торчинская Т.В., Шматов Л.А., Шейнкман М.К., Строчков В.И. Преобразование глубоких центров в процессе деградации GaP светодиодов // ФТП. – 1986 – Т20 - №4 – 701-707.
- [21]. Шик Л.Я. Об определении параметров глубоких центров методом емкостной спектроскопии // ФТП – 1984 – Т18. №10 – с 1759.
- [22]. Васильев Л.В., Смагулова С.А., Шаймеев С.С. К вопросу и методике обработки спектров DLTS // ФТП – 1983 – Т 11, вып 1 – с 162-164.
- [23]. Ж.С.Абдуллаев, Б.Каримов Исследование изменение параметров светоизлучающих диодов в процессе эксплуатации// Vol. 54 (2024): Miasto Przyszłości 50 Polsha 507-511 paje 2024