

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ СВЕТОДИОДОВ

Ирха В.И., Марколенко П.Ю., Марколенко Т.Д.

*Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул Кузнецкая, 1.
vols@onat.edu.ua*

ВПЛИВ РУХУ ДОМІШКОВИХ ІОНІВ НА СТАБІЛЬНІСТЬ СВІТЛОДІОДІВ

Ирха В.И., Марколенко П.Ю., Марколенко Т.Д.

*Одесская национальная академия связи им. О.С. Попова,
65029, Украина, м. Одеса, вул. Кузнецкая, 1.
vols@onat.edu.ua*

THE INFLUENCE OF THE MOVEMENT OF IMPURITY IONS ON THE STABILITY OF LEDS

Irkha V.I., Markolenko P.Yu., Markolenko T.D.

*O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,
1 Kuznechnaya St., 65029, Ukraine, Odessa.
vols@onat.edu.ua*

Аннотация. Изучено влияние движения примесных центров на стабильность светоизлучающих диодов на основе GaInAsP и их эффективность. Стабильность и эффективность электролюминесценции светодиодов в основном определяется соотношением между интенсивностями излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Исследовались электролюминесцентные и электрические характеристики светодиодов. Для выяснения механизма деградации светодиодов исследовалось влияние токовой тренировки их в течение 3000 час. при различных плотностях тока на их стабильность, эффективность и на электрические характеристики. Показано, что деградация светодиодов при низких уровнях инжекции связана с дрейфом примесных центров вблизи неоднородностей $p-n$ -переходов. Показано, что в процессе деградации светодиодов величина излучательной компоненты тока при фиксированном напряжении изменяется мало. В тоже время безызлучательные компоненты тока существенно вырастают. Установлено, что рост безызлучательных компонент тока связан с дрейфом подвижных примесей к неоднородностям $p-n$ -перехода. Рассчитана кинетика деградации светодиодов с применением определенных допущений. Проведена оценка коэффициента диффузии ионов, ответственных за деградацию диодов. Показано, что "внезапные" отказы светодиодов имеют ту же природу, что и постепенная их деградация. Они могут происходить при достаточно высокой концентрации подвижной примеси. Полученные зависимости интенсивности излучения от длительности деградации можно использовать для оценки коэффициента диффузии подвижной примеси.

Ключевые слова: светодиод, примесные ионы, стабильность, эффективность, деградация, коэффициент диффузии, концентрация примеси.

Анотация. Вивчено вплив руху домішкових центрів на стабільність світловипромінюючих діодів на основі GaInAsP та на їх ефективність. Стабільність та ефективність електролюмінесценції світлодіодів в основному визначається співвідношенням між інтенсивностями випромінювальної і безвипромінювальної рекомбінації носіїв заряду. Досліджувалися електролюмінесцентні та електричні характеристики світлодіодів. Для з'ясування механізму деградації світлодіодів досліджувався вплив струмового тренування їх протягом 3000 год. при різних густинах струму на їх стабільність, ефективність і на електричні характеристики. Показано, що деградація світлодіодів при низьких рівнях інжекції пов'язана із дрейфом домішкових центрів поблизу неоднорідностей $p-n$ -переходів. Показано, що в процесі деградації світлодіодів величина випромінювальної компоненти

струму при фіксованій напрузі змінюється мало. В той самий час безвипромінювальні компоненти струму суттєво зростають. Встановлено, що зростання безвипромінювальних компонент струму пов'язане із дрейфом рухливих домішок до неоднорідностей $p-n$ -переходу. Розрахована кінетика деградації світлодіодів із застосуванням певних допусків. Проведено оцінку коефіцієнта дифузії іонів, що відповідають за деградацію діодів. Показано, що "раптові" відмови світлодіодів мають ту саму природу, що і поступова їх деградація. Вони можуть відбуватися при досить високій концентрації рухливої домішки. Отримані залежності інтенсивності випромінювання від тривалості деградації можна використовувати для оцінки коефіцієнта дифузії рухливих домішок.

Ключові слова: світлодіод, домішкові іони, стабільність, ефективність, деградація, коефіцієнт дифузії, концентрація домішки.

Abstract. The influence of the motion of impurity centers on the stability of GaInAsP-based light-emitting diodes and their efficiency are studied. The stability and efficiency of the electroluminescence of LEDs is mainly determined by the ratio between the intensities of the radiative and non-radiative recombination of charge carriers. We studied the electroluminescent and electrical characteristics of LEDs. To clarify the degradation mechanism of LEDs, we studied the effect of their current training for 3000 hours at various current densities for stability and efficiency and for their electrical characteristics. It was shown that the degradation of LEDs at low injection levels is associated with the drift of impurity centers near the inhomogeneities of $p-n$ -junctions. It is shown that during the degradation of LEDs, the magnitude of the radiative current component at a fixed voltage varies little. At the same time, nonradiative current components increase significantly. It was established that the growth of nonradiative current components is associated with the drift of mobile impurities to inhomogeneities of the $p-n$ -junction. The kinetics of LED degradation was calculated using certain assumptions. The diffusion coefficient of the ions responsible for the degradation of the diodes is estimated. It is shown that "sudden" LED failures are of the same nature as their gradual degradation. They can occur at a sufficiently high concentration of mobile impurities. The obtained dependences of the radiation intensity on the duration of degradation can be used to estimate the diffusion coefficient of a mobile impurity.

Key words: LED, impurity ions, stability, efficiency, degradation, diffusion coefficient, impurity concentration.

Эффективность электролюминесценции светоизлучающих диодов существенно определяется соотношением между интенсивностями излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Это соотношение зависит от зонной структуры используемого полупроводника, а также от концентраций активаторных примесей, фоновых примесей и собственных дефектов в полупроводниках [1]. Тем самым эффективность электролюминесценции светодиодов, в особенности при низких уровнях инжекции, ограничивается безызлучательной рекомбинацией носителей заряда через глубокие уровни, а также связана с дислокациями. На характер нестабильностей светодиодов влияет структура и технология получения $p-n$ -переходов [2]. Существует множество работ, посвященных изучению механизмов нестабильностей светодиодов, однако большинство из них охватывает узкий круг вопросов [1 - 4]. Есть предположения о связи указанных уровней с собственными и примесными точечными дефектами полупроводников группы A^3B^5 . Но экспериментальных данных недостаточно для ответа на вопросы о природе глубоких уровней, ответственных за безызлучательную рекомбинацию в квазинейтральных областях и в обедненном слое $p-n$ -переходов, и механизме процессов, приводящих к появлению данных уровней в $p-n$ -переходах. Деградация светодиодов, т.е. постепенное изменение интенсивности излучения, ограничивает их срок службы, кроме того, необходимость учета параметров дрейфа в светодиодах приводит к усложнению электронных устройств, в которых светодиоды используются в качестве функциональных элементов. Литературные данные и результаты наших предыдущих исследований показали, что существует несколько механизмов деградации светодиодов, связанных с изменениями как механизма протекания тока через $p-n$ -переход, так и вероятностей излучательной и безызлучательной рекомбинации неосновных носителей заряда в квазинейтральных областях кристалла.

В настоящее время исследования механизмов деградации светодиодов с целью повышения их стабильности ведутся в трех направлениях: 1) выработка количественной теории различных механизмов деградации; 2) изучение влияния различных

технологических факторов и внешних воздействий на деградационные процессы; 3) изучение закономерностей деградации конкретных полупроводниковых структур, связанных с разработкой новых светоизлучающих устройств. Такие исследования позволяют разработать пути повышения стабильности и эффективности светодиодов и дадут возможность прогнозировать надежность различных излучателей.

Деградация *p-n*-переходов при длительном пропускании прямого тока через него происходит либо за счет роста обратного тока [5], либо за счет роста избыточной и рекомбинационной компоненты прямого тока или низкочастотных шумов [1,2]. Из анализа литературы можно сделать вывод о том, что работ по влиянию движения примесных ионов на стабильность светодиодов и их эффективность для различных полупроводниковых материалов очень мало, а описания таких материалов для светодиодов на основе GaInAsP практически нет.

Цель данной статьи: выяснить влияние движения примесных ионов на стабильность светодиодов на основе GaInAsP. Характеристики исследованных светодиодов описаны в работе [2]. Как показано в этой работе, деградация светодиодов при низких уровнях инжекции может быть связана с дрейфом примесных центров вблизи неоднородностей *p-n*-переходов.

Для выяснения причин уменьшения эффективности и стабильности исследуемых излучателей при снижении уровня инжекции и повышении температуры были изучены электрические и электролюминесцентные характеристики диодов при различных температурах. Изучалась кинетика деградации светодиодов в течении 3000 час. Для выяснения механизма деградации анализировались изменения мощности излучения при низких и высоких уровнях инжекции в одних и тех же образцах. По величине фототока *p-n*-переходов оценивались изменения времени жизни электронов в активной области светодиодов.

На рис. 1 показаны зависимости интегральной интенсивности излучения типичных диодов на основе GaInAsP от длительности пропускания прямого тока. Кривые $\Phi(t)$ всех диодов, полученные при низких плотностях тока, были двух типов: плавные кривые и кривые с резким, “внезапным” уменьшением излучения.

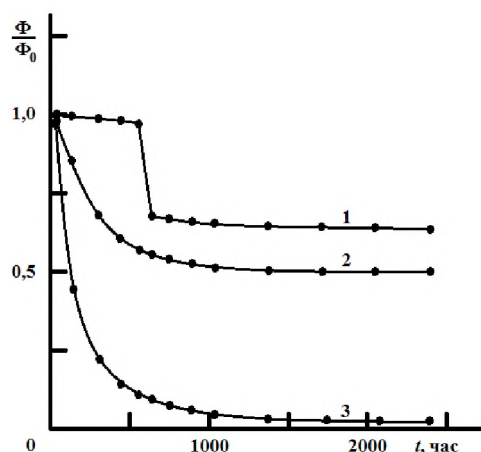


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности излучения от длительности деградации образцов светодиодов на основе GaInAsP

На рис. 2 кривые 1 и 2 представляют зависимости интенсивности излучения типичного диода на основе GaInAsP от напряжения до (1) и после (2) деградации. Эти зависимости можно представить в виде

$$\Phi = \Phi_0 e^{\frac{e(U-\Delta U)}{kT}}, \quad (1)$$

где ΔU – падение напряжения на последовательном сопротивлении светодиода. Тогда зависимость $\Phi(U)$ свидетельствует, что излучение обусловлено рекомбинацией электронов, инжектированных в *p*-область структур. Этот механизм характерен для

плавных p - n -переходов светодиодов на основе соединений A^3B^5 [2, 4]. В процессе деградации светодиодов механизм излучательной рекомбинации не меняется, о чем свидетельствовала неизменность спектров электролюминесценции, а также сохранение вида зависимости $\Phi(U)$.

Вольтамперные характеристики типичного GaInAsP диода до и после деградации показаны на рис. 2 (кривые 3 и 4) и для всех образцов могут быть представлены в виде

$$I = I_i + I_t + I_2, \quad (2)$$

где инжекционный ток

$$I = I_i^0 e^{\frac{e(U-\Delta U)}{kT}}, \quad (3)$$

зависит от напряжения также, как и интенсивность излучения. Безызлучательная компонента тока

$$I_t = I_t^0 e^{\alpha U}, \quad (4)$$

где коэффициент α не зависит от температуры, связывается с туннелированием электронов через глубокие примесные уровни в обедненном слое в местах резкого сужения p - n -переходов [3]. Безызлучательный ток утечки

$$I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad (5)$$

характерный для большинства GaInAsP-диодов, также обусловлен наличием резких локальных сужений p - n -перехода и ограничивается величиной сопротивления растекания носителей заряда из указанных неоднородностей.

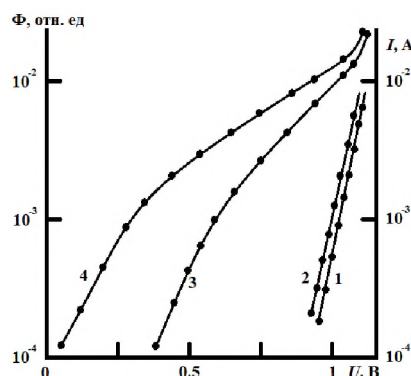


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности излучения (1, 2) и тока (3, 4) от напряжения до (1, 3) и после (2, 4) деградации светодиодов

При деградации светодиодов величина излучательной компоненты тока при фиксированном напряжении меняется мало (кривые 1 и 2 на рис. 2). В тоже время безызлучательные компоненты тока I_t , I_2 существенно возрастают, как видно из сравнения кривых 3 и 4 рис. 2. Рост безызлучательных компонент тока не может быть связан с механизмом Голда-Вайсберга, предполагающим переход примесных атомов из узлов в межузлия с использованием энергии рекомбинирующих электронов, так как в неоднородностях электроны преодолевают потенциальный барьер туннелированием. В тоже время плотность тока в указанных неоднородностях и напряженность поля в их окрестностях намного выше, чем в однородных областях кристалла. Поэтому нужно связывать рост безызлучательных компонент тока с дрейфом подвижных примесей в неоднородностях p - n -перехода [2, 4].

Кинетика деградации светодиода нами рассчитывалась при следующих допущениях. Во-первых, деградация связана с дрейфом ионов одного сорта в одной из квазинейтральных областей кристалла, например, межузельных доноров в p -области. Во-

вторых, электрическое поле в p -области слабое. Падение напряжения в последовательном сопротивлении диода

$$\Delta U < \frac{kT}{e}. \quad (6)$$

Тогда подвижная примесь в любой момент времени приблизительно однородно распределяется по p -области. В-третьих, ионный ток через однородность I_i пропорционален дырочному току в неоднородности

$$I_i = I_n \frac{\mu_i N}{\mu_p P}, \quad (7)$$

где μ_i , μ_p , N , P – подвижности и концентрации подвижных ионов и дырок в p -области соответственно. В-четвертых, ток через однородность линейно зависит от числа накопленных в неоднородностях ионов

$$I_n = I_n^0 + C[N_0 - N(t)], \quad (8)$$

где I_n^0 , N_0 – начальное значение тока через неоднородность и концентрация подвижных ионов в p -области; C – размерный коэффициент. Данное допущение справедливо как для избыточных токов, так и для омических токов утечки. В-пятых, изменения напряжения на светодиоде в процессе деградации невелики. При расчете безызлучательных компонент тока в (4) и (5) считаем $U = \text{const}$. Тогда ток через неоднородность

$$I_n(t) = I_n^0 + CN \frac{e^{bt} - 1}{e^{bt} + \frac{CN_0}{I_n^0}}, \quad (9)$$

где

$$b = \frac{\mu_i}{qV\mu_p P} (I_n^0 + CN_0) \quad (10)$$

и соответственно V – объем p -области; q – заряд иона. Когда деградация светодиода происходит при фиксированной величине тока, то число генерируемых диодом фотонов

$$\Phi(t) = \eta_0 \left[I - I_n^0 + CN_0 \frac{e^{bt} - 1}{e^{bt} + \frac{CN_0}{I_n^0}} \right], \quad (11)$$

где η_0 – квантовый выход электролюминесценции при отсутствии неоднородностей в p - n -переходе. Кинетика деградации светодиодов существенно зависит от концентрации подвижной примеси в p -области кристалла. Если $\frac{CN_0}{I_n^0} < 1$, то

$$\Phi(t) = \eta_0 [I - I_n^0 + CN_0 (1 - e^{-bt})], \quad (12)$$

что соответствует экспериментально наблюдаемой зависимости. В светодиодах с большой концентрацией подвижной примеси $\frac{CN_0}{I_n^0} \gg 1$ в начальной стадии деградации

$$\Phi(t) = \eta_0 (I - I_n^0 e^{bt}). \quad (13)$$

При $I_n^0 \ll I$ это соответствует “внезапному” резкому изменению потока фотонов в момент времени

$$t = \frac{1}{b} \ln \frac{I}{I_n^0}. \quad (14)$$

Следует отметить, что качественно подобные результаты получаются и в случае “сильного” поля в p -области, т.е. при $\Delta U \gg \frac{kT}{e}$.

На рис. 3 показана кинетика изменения интенсивности излучения и сопротивления утечки при деградации GaInAsP-диода. Синхронное изменение указанных величин свидетельствует в пользу данной модели деградации. Так как $\Phi \sim I \cdot I_n^0$, то при $I_n^0 \ll 1$ существенные изменения тока утечки наблюдаются раньше, чем происходит “внезапный” отказ светодиода. Это может быть использовано для прогнозирования “внезапных” отказов излучающих диодов. Выражения (9) – (14) можно использовать для оценки коэффициента диффузии ионов, ответственных за деградацию светодиодов, с учетом

$$I_n^0 + CN_0 = I_n^0 = \lim_{t \rightarrow \infty} I_n(t). \quad (15)$$

Анализ кривых $\Phi(t)$ “постепенной” деградации светодиодов дает для подвижной примеси в GaInAsP коэффициент диффузии $D = (3...5) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ при 25°C . По кривым “внезапной” деградации светодиодов с использованием (9) – (15) получаем $D = (2...8) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$.

Удовлетворительное согласие полученных оценок свидетельствует о выполнении использованных для расчетов допущений.

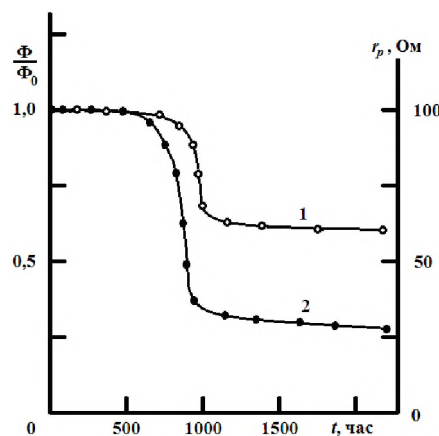


Рисунок 3 – Кинетика деградации интенсивности излучения (1) и сопротивления утечки (2) GaInAsP-диода

Представляет интерес оценка концентрации подвижной примеси в p -области, при которой возможен “внезапный” отказ светодиода. Как следует из (11) – (15), для внезапного отказа необходимо

$$\frac{eN_0}{I_n^0} = \frac{I_n^*}{I_n^0} \gg 1, \quad (16)$$

Если подвижная примесь стягивается к неоднородности p - n -перехода объемом V_n , причем начальная концентрация примеси в неоднородности равна C_n^0 , то (16) соответствует

$$C \gg C_n^0 \frac{V_n}{V}. \quad (17)$$

С учетом типичных параметров исследованных образцов получили необходимое условие “внезапного” возрастания безызлучательной компоненты тока $C \gg 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Чтобы при этом произошло резкое уменьшение интенсивности излучения, в (11) – (15) величина I_n^* должна быть одного порядка со значением полного тока диода I .

Таким образом, интенсивность излучения диодов при низких плотностях тока может как плавно меняться со временем, так и “внезапно” уменьшаться в какой-то момент времени. Указанные изменения интенсивности излучения светодиода связаны с изменением безызлучательных компонент тока.

В заключение можно сказать следующее. Деградация излучательных диодов на основе GaInAsP при низких плотностях тока не может быть объяснена механизмом Голда-Вайсберга. Увеличение безызлучательных компонент тока можно объяснить дрейфом примесных ионов к неоднородностям *p-n*-переходов.

Расчет показывает, что “внезапные” отказы светодиодов имеет ту же природу, что и постепенная деградация, и могут происходить при достаточно высокой концентрации подвижной примеси. “Внезапные” отказы излучательных диодов можно прогнозировать, измеряя временной ход безызлучательных компонент тока в процессе деградации.

Полученные зависимости интенсивности излучения от длительности токовой деградации светодиодов можно использовать для оценки коэффициента диффузии подвижной примеси. За деградацию светодиодов на основе GaInAsP при низких плотностях тока ответственна примесь со значением коэффициента диффузии $D = (2...8) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ при 25°C.

Следует отметить, что основные закономерности деградации излучательных диодов на основе GaInAsP такие же, как и для других светодиодов, изготовленных из полупроводниковых материалов A^3B^5 (GaAs, GaAlAs и т.д.). Однако исследованные GaInAsP-светодиоды имеют меньший срок службы и многие из них при низких плотностях тока подвержены “внезапным” отказам, что связано с большей дефектностью GaInAsP-структур по сравнению с GaAs и GaAlAs. Для большинства исследованных светодиодов постоянство квантового выхода при изменении величины смещения имеет место при значении тока более 100 мА, достижимых лишь в импульсном режиме питания. Стабильность светодиодов на основе GaInAsP более высокая в импульсных режимах, соответствующих высоким плотностям тока, если за одно и то же время деградации через *p-n*-переход проходит один и тот же заряд.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Викулин И.М. Безызлучательная рекомбинация в излучающих *p-n*-переходах. Обзор по электронной технике/ И.М. Викулин, В.И. Ирха. – Одесса, 1996. – 47 с.
2. Ирха В.И. Методы повышения эффективности и надежности излучающих диодов на основе GaInAsP/ В.И. Ирха // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова.– 2019.– № 1. – С.12-22.
3. Берг А. Светодиоды/ А.Берг, П. Дин. – М.Мир, 1973. – 686 с.
4. Птащенко А.А. Деградация светоизлучающих диодов (Обзор) / А.А. Птащенко // Журнал прикладной спектроскопии. – 1980.– Т. 33.– № 5.– С. 781-803.
5. Ирха В.И. Качественно-корреляционная модель деградации оптоэлектронных приборов / В.И. Ирха, Г.В. Макаренко// Фотоэлектроника. – 2000. – № 9. – С.73-77.

REFERENCES:

1. Vikulin I.M., Irkha V.I. “The Nonradiative recombination in radiating *p-n*-junctions. The Survey paper of electronic technology”. Odessa: USAC 1996. 47 p.
2. Irkha V.I. “Methods for increasing the efficiency and reliability of emitting diodes based on GaInAsP”. Naukovi praczi ONAT O.S. Popov № 1 (2019); 12-22.
3. Berg A., Dean P. „LEDs“. M.Mir, 1973. 686 p.
4. Ptashchenko A.A. “Degradation of light emitting diodes. (Review)”. Journal of Applied Spectroscopy. № 5 (1980) v. 33; 781-803.
5. Irkha V.I., Makarenko G.V. “Qualitative – correlation model of a degradation of optoelectronic devices”. Photoelectronics. № 9 (2000); 73-77.

DOI 10.33243/2518-7139-2020-1-1-101-107