

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaInAsP

Ирха В.И.

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

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ВИПРОМІНЮЮЧИХ ДІОДІВ НА ОСНОВІ GaInAsP

Ирха В.И.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
phys@onat.edu.ua*

THE METHODS FOR INCREASING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF EMITTING DIODES BASED ON GaInAsP

Irkha V.I.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
phys@onat.edu.ua*

Аннотация. Величина квантового выхода электролюминесценции полупроводниковых излучателей оптического диапазона определяется параметрами нескольких этапов процесса преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения. Для повышения эффективности и стабильности излучающих диодов исследовались потери на отдельных этапах указанного процесса. При получении сведений о распределении примесей в *p-n*-переходах светоизлучающих диодов измерялись вольтфарадные характеристики. В исследованных излучателях получено линейное распределение примеси в *p-n*-переходе. Изучены электрические и электролюминесцентные характеристики излучающих диодов на основе GaInAsP. Проведено выяснение механизма деградации диодов при токовой их тренировке в течение 3000 час., при различных плотностях тока и температурах на интенсивность излучения, измеряемую при низком и высоком уровнях инжекции, на величину фототока *p-n*-переходов и на их электрические характеристики. Показано, что деградация исследованных излучателей обусловлена изменением соотношения между излучательной и безызлучательной компонентами тока в *p-n*-переходах, а также изменением времени жизни электронов в активной области гетероструктур. Кинетика деградации диодов объясняется дрейфом заряженных дефектов в электрическом поле. Получено, что уменьшение квантовой эффективности диодов на основе GaInAsP при снижении уровня инжекции связано с наличием локальных сужений *p-n*-переходов. Показано, что для уменьшения деградации излучающих диодов и для повышения их квантовой эффективности при низких уровнях инжекции необходимо уменьшить концентрацию остаточных примесей и дефектов кристаллической решетки в используемых полупроводниковых гетероструктурах.

Ключевые слова: излучающие диоды, эффективность, надежность, вольтамперные, ваттамперные и вольтваттные характеристики, инжекция, квантовая эффективность, деградация, фототок.

Анотація. Величина квантового виходу електролюмінісценції напівпровідникових випромінювачів оптичного діапазону залежить від параметрів декількох етапів процесу перетворення електричної енергії в енергію оптичного випромінювання. Для підвищення ефективності та стабільності випромінюючих діодів досліджувались втрати на окремих етапах зазначеного процесу.

При отриманні даних про розподіл домішок в $p-n$ -переходах світло-випромінюючих діодів вимірювалися вольтфарадні характеристики. В досліджених випромінювачах отримано лінійний розподіл домішок в $p-n$ -переході. Вивчені електричні та електролюмінесцентні характеристики випромінюючих діодів на основі GaInAsP. Проведено вивчення механізму деградації діодів при їх тренуванні струмом 3000 год., при його різній густині струму та температурах на інтенсивність випромінювання, що вимірюється при низькому та високому рівнях інжекції, на величину фотоструму $p-n$ -переходів і на їх електричні характеристики. Показано, що деградація досліджених випромінювачів обумовлена зміною співвідношення між випромінюючою та не випромінюючою компонентами струму у $p-n$ -переходах, а також зміною часу життя електронів в активній області гетероструктур. Кінетика деградації діодів пояснюється дрейфом заряджених дефектів в електричному полі. Отримано, що зменшення квантової ефективності діодів на основі GaInAsP при зниженні рівня інжекції пов'язане з присутністю локальних звужень $p-n$ -переходів. Показано, що для зменшення деградації випромінюючих діодів та для підвищення їх квантової ефективності при низьких рівнях інжекції необхідно зменшити концентрацію залишкових домішок та дефектів кристалічної решітки у використуваних напівпровідникових гетероструктурах.

Ключові слова: випромінюючі діоди, ефективність, надійність, вольтамперні, ватамперні та вольтватні характеристики, інжекція, квантова ефективність, деградація, фотострум.

Abstract. The quantum production of the electroluminescence of semiconductor emitters of the optical range is determined by the parameters of several stages of the process of converting electrical energy into optical radiation energy. To improve the efficiency and stability of the emitting diodes, the losses at certain stages of this process were investigated. When obtaining information on the distribution of impurities in $p-n$ junctions of light-emitting diodes, volt-farad characteristics were measured. In the studied radiators, a linear impurity distribution in the $p-n$ junction was obtained. The electrical and electroluminescent characteristics of emitting diodes based on GaInAsP were studied. The elucidation of the mechanism of diode degradation during their current training for 3000 hours at different current densities and temperatures, on the radiation intensity, that measured at low and high injection levels, on the value of the photocurrent $p-n$ -junction and on their electrical characteristics was carried. It is shown that the degradation of the studied radiators is due to the change in the ratio between the radiative and non-radiative components of the current in $p-n$ -junctions, as well as the change in the electron lifetime in the active region of the heterostructures. The kinetics of degradation of diodes is explained by the drift of charged defects in an electric field. It was found that a decrease in the quantum efficiency of GaInAsP-based diodes with a decrease in the injection level is due to the presence of local narrowing of $p-n$ -junctions. It is shown that in order to reduce degradation of emitting diodes and to increase their quantum efficiency at low injection levels, it is necessary to reduce the concentration of residual impurities and lattice defects in the used semiconductor heterostructures.

Key words: emitting diodes, efficiency, reliability, current-voltage, current-voltage and voltage characteristics, injection, quantum efficiency, degradation, photocurrent.

Излучающие диоды на основе GaInAsP применяются в метрологии. Технические характеристики метрологических систем существенно зависят от эффективности и надежности используемых излучающих диодов. Величина квантового выхода излучающих диодов определяется параметрами нескольких этапов преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения. На характер нестабильностей излучателей влияют структура и технологические особенности получения $p-n$ -переходов, наличие неконтролируемых примесей и дефектов. Поэтому повышение эффективности и надежности излучающих диодов является важной, как научной, так и технической проблемой, а обсуждаемая тема представляет интерес для широкого круга исследователей, работающих в области оптоэлектроники и измерительной техники.

В настоящее время имеется много работ, посвященных изучению механизмов нестабильностей излучающих диодов на основе полупроводников группы A^3B^5 . Отмечается роль дефектов структуры кристаллической решетки, участие неконтролируемых примесей, вакансий и междоузельных атомов в деградации излучающих диодов. Однако большая часть из них охватывает относительно узкий круг вопросов [1-5]. Остаются нерешенными вопросы: 1) с какими этапами преобразования энергии связаны нестабильности излучателей; 2) каков механизм нестабильностей. Решение данных вопросов необходимо для разработки путей повышения эффективности и стабильности излучающих диодов, для количественного описания деградационных процессов и прогнозирования надежности излучателей.

При длительном пропускании тока через *p-n*-переходы в полупроводниковых соединениях A^3B^5 происходит рост рекомбинационной и избыточной компонент прямого тока [2, 3], обратного тока [4], а также низкочастотных шумов тока [2], т.е. наблюдается деградация *p-n*-переходов. Различными авторами эти изменения объясняются либо движением примесных центров к *p-n*-переходу из квазинейтральных областей, либо изменением положения примесных атомов в решетке. Высказываются также предположение о роли меди, междоузельного цинка и других подвижных примесей в указанных явлениях. Исследовались также происходящие при пропускании прямого тока изменения спектров примесных уровней в *p-n*-переходах на основе полупроводников группы A^3B^5 с примесью Te, Si, Zn в качестве доноров и акцепторов соответственно [1]. Из анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что работ по исследованию методов повышения эффективности и надежности излучающих диодов на основе полупроводников группы A^3B^5 довольно мало, а описания таких результатов для светодиодов на основе GaInAsP практически отсутствуют.

Цель данной статьи – нахождение методов и путей повышения эффективности и надежностей излучающих диодов на основе GaInAsP. Исследовались светоизлучающие диоды на основе четверного соединения твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$, предназначенные для работы в области спектра 1000-1100 Нм. Эпитаксиальные слои и структуры были получены методом жидкофазной эпитаксии. В процессе принудительного охлаждения растворов–расплавов подложка последовательно перемещалась через ванны с растворами–расплавами различных составов.

Основными структурами на основе этого материала были структуры типа *n-InP-n(p)* $Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$, а легирующими примесями *p*- и *n*- областей были цинк и теллур соответственно. Подложкой являлось бинарное соединение InP. На гетерогранице InP – *p*- $Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$ имеется разрыв в зоне проводимости.

Для получения сведений о распределении примесей в *p-n*-переходах светоизлучающих диодов измерялись вольтфарадные характеристики. Изменения таких характеристик проводились на установке, основным элементом которой был мост типа E10-2 на частоте 1 МГц. Установка позволяла измерять абсолютные значения емкости до 400 пФ с точностью до 4% и напряжений с точностью до 0,5%. Для исследованных излучателей оказалось линейное распределение примеси в *p-n*-переходе (рис. 1).

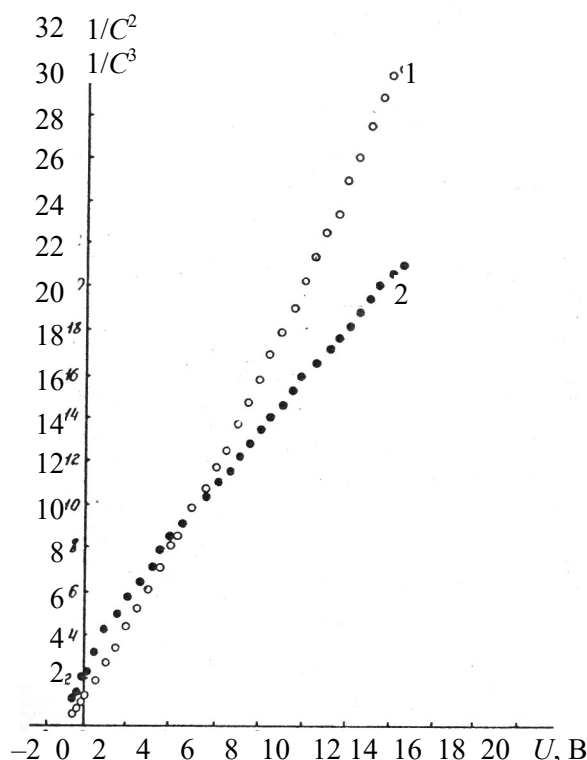


Рисунок 1 – Вольтфарадная характеристика p - n -перехода на основе GaInAsP, измеренная на частоте 1 МГц при 293 К: 1 – $1/C^3(U) \cdot 10^7$ пФ; 2 – $1/C^2(U) \cdot 10^5$ пФ⁻²

Экстраполирование линейной зависимости $1/C^3(U)$ в область положительных смещений дает величину емкостного напряжения отсечки $U_{отс} = 1$ В.

Ширина слоя объемного заряда для линейных переходов при нулевом смещении рассчитывалась по известной формуле $W_0 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C}$ и составляла $\sim 5,23 \cdot 10^{-5}$ см.

Максимальная напряженность поля в слое объемного заряда определялась зависимостью

$$E_{\max} = \frac{\nu}{\nu - 1} \cdot \frac{U_{отс} - 1}{W_0}, \quad (1)$$

где $\nu = 3$, $U = 0$ и составляла $E_{\max} \approx 2,82 \cdot 10^4$ В/см.

Градиент концентрации примеси определялся из состояния

$$U_{отс} - U = \frac{qa}{12\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C} \right)^5. \quad (2)$$

При подстановке известных величин получаем

$$a = 73 \cdot 10^6 \frac{U_{отс}}{W_0} \text{ (см}^{-4}\text{)}. \quad (3)$$

Для исследованных излучателей градиент концентрации примеси составлял $5,1 \cdot 10^{20}$ см⁻⁴.

Как уже отмечалось, величина квантового выхода электролюминесценции полупроводниковых излучателей оптического диапазона определяется параметрами нескольких этапов процесса преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения. Для повышения эффективности и стабильности полупроводниковых излучателей необходимо исследовать роль потерь на отдельных этапах указанного процесса при различных уровнях инжекции и в определенном диапазоне температур. Как известно [1], величину внешнего квантового выхода излучения светоизлучающих диодов можно представить в виде

$$\beta = \beta_i \cdot \beta_r \cdot \beta_n \cdot \beta_s, \quad (4)$$

где β_i – коэффициент инжекции неосновных носителей заряда в область излучательной рекомбинации; β_r – квантовый выход излучательной рекомбинации инжектированных носителей заряда; β_n и β_s – множители, соответствующие прохождению излучения внутри полупроводника и через границу полупроводник-воздух.

Температурная зависимость интенсивности электролюминесценции связана, в основном, с изменением коэффициентов β_i и β_r .

Для изучения механизма изменения квантового выхода электролюминесценции с температурой исследовалось отдельно $\beta_i(T)$ и $\beta_r(T)$, для чего параллельно измерялось влияние температуры на интенсивность фото- и электролюминесценции. Образцы помещались в оптический криостат, позволяющий менять температуру в пределах 80...400 К. Излучатели питались от стабилизированного источника напряжения, а напряжение измерялось прибором класса 0,2. Величина тока в пределах от 10^{-10} до 10^{-1} А измерялась прибором класса А. Излучение через конденсор попадало на входную щель монохроматора и регистрировалось с помощью фотоумножителя ФЭУ-62, подключенного к микровольтметру постоянного тока В2-11. При измерении фотолуминесценции излучения лазера ЛГ-126, промоделированное механическим модулятором направлялось на образец, а интенсивность люминесценции регистрировалось системой монохроматор – ФЭУ-62 – селективный вольтметр У2-6.

Так как светоизлучающие диоды на основе GaInAsP применяются в метрологических целях, то технологические характеристики метрологических систем существенно зависят от стабильности энергетической яркости используемых светоизлучающих диодов. При пропускании прямого тока происходит деградация светодиодов, т.е. постепенное изменение интенсивности их излучения. Кроме того, могут наблюдаться внезапные отказы, т.е. полное исчезновение излучения. Поэтому исследование механизма деградации светодиодов с целью повышения их срока службы является важной научно-технической проблемой.

Для изучения влияния длительной токовой тренировки на интенсивность излучения светодиодов при высоких уровнях инжекции необходимо импульсное питание образцов и осциллографическое измерение величины фототока приемника излучения. Это дает целый ряд погрешностей: неточности измерения величины импульсного тока через светодиод и фототока приемника излучения, временной дрейф амплитудной и частотной характеристик усилителей осциллографов и т.п.

Для уменьшения влияния указанных погрешностей с генератора прямоугольных импульсов подавались на образец П-импульсы напряжения величиной до 30 В с длительностью фронтов 0,5 мкс. Величина тока измерялась падением напряжения на нагрузочном сопротивлении величиной 2 Ом. Это напряжение подавалось на блок сравнения, выполненного на базе электромеханического реле, питаемого от сети. Реле подключалось к выходу осциллографа С 1-15 (с дифференциальным предусилителем) попеременно с частотой 50 Гц, то импульсное напряжение, снимаемое с нагрузочного сопротивления, то постоянное регулируемое напряжение, подаваемое от источника постоянного напряжения и измеряемое вольтметром М 94. Импульсное напряжение измерялось при этом компенсированным методом. Интенсивность излучения светодиодов измерялось с помощью кремниевого фотодиода 1690 – В, либо ФД – 7К, питаемых стабилизированным напряжением. В процессе измерений положение светодиодов жестко фиксировалось относительно фотодиода. Величина фототока фотодиода измерялась аналогично величине тока питания светодиода с использованием второго входа дифференциального усилителя осциллографа при постоянной проверке балансировки усилителя. Это позволило при многократном измерении стабильности светодиода получить случайные отклонения отдельных результатов измерения интенсивности излучения от ее среднего значения при фиксированном значении тока не более 5%.

При низких уровнях инжекции относительные изменения интенсивности излучения измерялись на постоянном токе.

Многие характеристики светодиодов определяются механизмом прохождения тока через *p-n*-переход. Теоретически он может быть представлен в виде:

$$I = I_i + I_r + I_t + I_s, \quad (5)$$

где $I_i = I_{i0} e^{\frac{eU}{kT}}$ – инжекционный ток; $I_r = I_{r0} e^{\frac{eU}{2kT}}$ – рекомбинационный ток; $I_t = I_{t0} e^{\alpha U}$ – туннельный ток; I_s – поверхностный ток утечки.

Интенсивность краевого излучения пропорциональна инжекционной компоненте токов, как при больших, так и при малых, когда инжекционная составляющая мала по сравнению с другими составляющими. Компоненты I_r , I_t и I_s не вносят вклад в электролюминесценцию.

Информацию о механизме прохождения тока дает анализ вольтамперных характеристик (ВАХ). На рис. 2 представлена ВАХ светодиода на основе GaInAsP, измеренная на постоянном токе. ВАХ исследованных *p-n*-переходов имеет вид $I = I_0(T) e^{\frac{eU}{nkT}}$, где $n = 2 \dots 3,3$. Такой вид характеристик свидетельствует о существенной роли рекомбинации в области объемного заряда исследованных *p-n*-переходов. Это может быть связано с наличием значительного количества рекомбинационных центров в области объемного заряда.

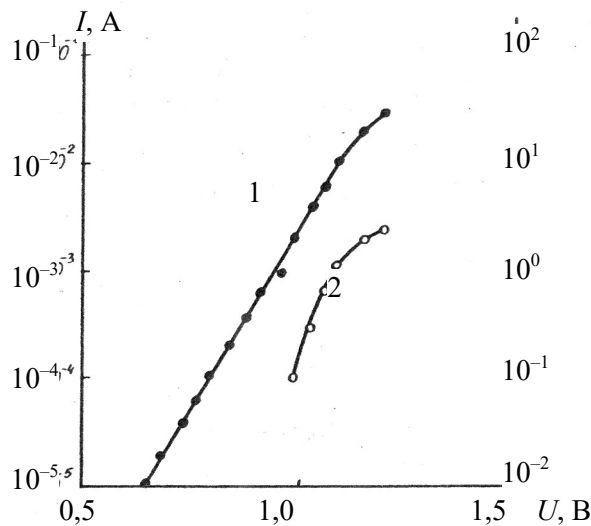


Рисунок 2 – Зависимость тока (1) и интенсивности излучения (2) от величины прямого смещения светодиода на основе GaInAsP

Люменамперные характеристики (ЛАХ) представляют зависимость интенсивности излучения светодиода от величины проходящего тока. Измерения ЛАХ и зависимости интенсивности от величины приложенного напряжения проводились на постоянном токе. Согласно [1, 6, 7] при фиксированной температуре, если интенсивность электролюминесценции пропорциональна инжекционной компоненте прямого тока, проходящего через *p-n*-переход, то квантовый выход излучения равен

$$\eta = \frac{\Phi}{I} = \frac{e^{\frac{eU}{kT}}}{e^{\frac{eU}{kT}} + Be^{\alpha U} + CU}, \quad (6)$$

где B , C – отношение констант, соответствующих туннельному току и току утечки к предэкспоненциальному множителю для инжекционного тока. В области малых токов интенсивность излучения должна быть слабой, так как при низких уровнях инжекции в

полном токе преобладают безызлучательные компоненты. Если преобладающим является ток утечки, то ЛАХ сверхлинейна и имеет вид

$$\frac{\Phi}{I} \sim \frac{A}{CU} e^{\frac{eU}{kT}}. \quad (7)$$

При увеличении уровня инжекции в области средних токов основной компонентой тока становится избыточный ток, также являющийся безызлучательным. ЛАХ остается сверхлинейной и может быть представлена в виде

$$\frac{\Phi}{I} \sim \frac{A}{B} e^{\left(\frac{e}{kT} - \alpha\right)U}. \quad (8)$$

При высоком уровне инжекции ЛАХ линейна:

$$\frac{\Phi}{I} \sim A, \quad (9)$$

т.е. основной компонентой тока является инжекционная.

Таким образом, наличие безызлучательных компонент тока (избыточный, токов утечки) снимает квантовую эффективность светодиодов и приводит к сверхлинейности ЛАХ.

Большинство светодиодов на основе GaInAsP имеют очень большие токи утечки (рис. 3), которые, как видно из рисунка, не дают вклада в излучение. Об этом же свидетельствует люменвольтовая характеристика (рис. 3, кривая 2). ЛАХ таких светодиодов также сверхлинейны (рис. 4). Для ряда образцов светодиодов характерны очень большие избыточные токи (рис. 5), что приводит к резкой сверхлинейности ЛАХ электролюминесценции. В области рабочих токов коэффициент достигает значения $k = \frac{d \lg \Phi}{d \lg I} \sim 10$.

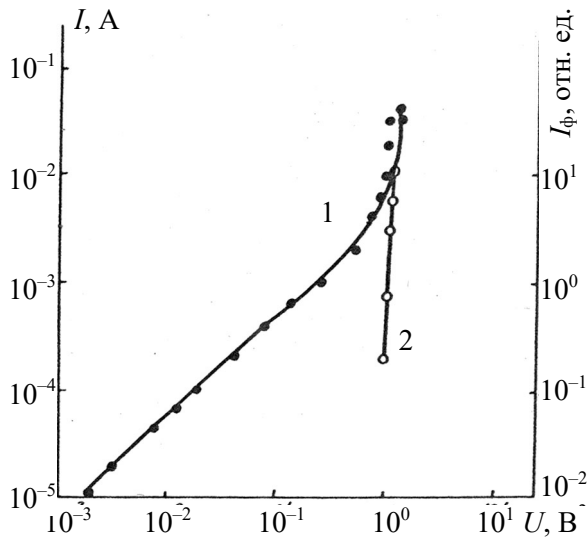


Рисунок 3 – Зависимость тока (1) и интенсивности излучения (2) от напряжения светодиода на основе GaInAsP

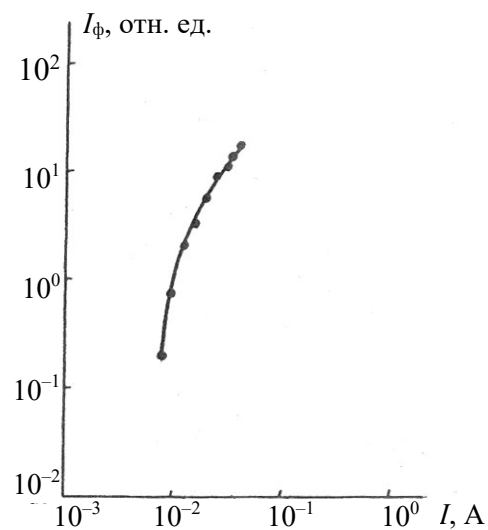


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности излучения от величины тока светодиода

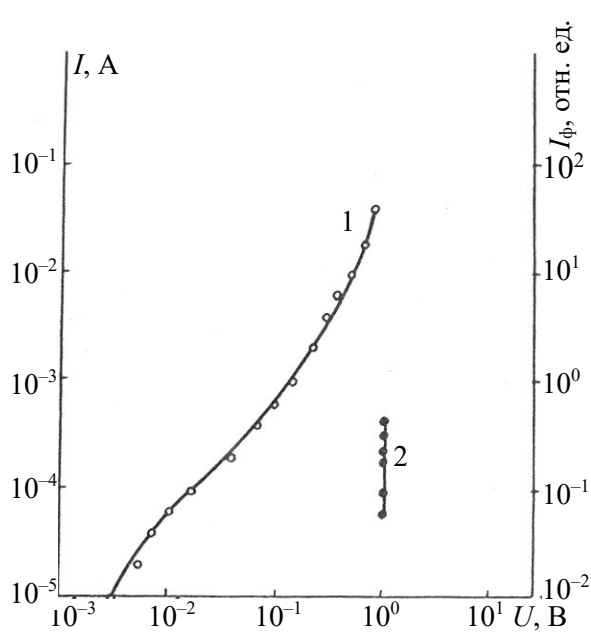


Рисунок 5 – Зависимость величины тока (1) и интенсивности излучения (2) от величины прямого смещения светодиода

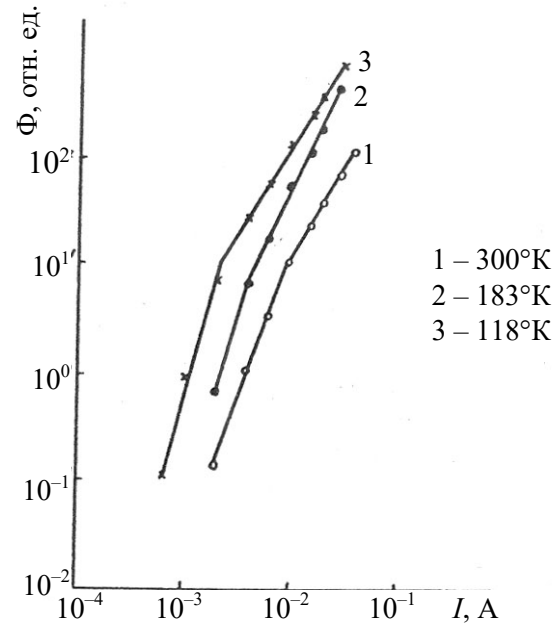


Рисунок 6 – ЛАХ светодиода на основе GaInAsP при различных температурах

ЛАХ светодиодов на основе GaInAsP при различных температурах сверхлинейны с разным наклоном в области малых и больших токов (рис. 6). На указанных кривых можно отметить два участка с различными коэффициентами $k = \frac{d \lg \Phi}{d \lg I}$, а именно: в области низких плотностей тока $k_1 = 2,4 \dots 2,5$ и $k_2 = 1,6 \dots 2,1$ при более высоких плотностях тока. Уменьшение квантового выхода излучения при повышении температуры может быть связано с влиянием доли безызлучательных переходов электронов, инжектированных в *p*-область. Люменвольтовые характеристики исследованных светодиодов при различных температурах также имеют два участка с различным наклоном кривых в области больших и малых прямых смещений. В области низких уровней инжекции зависимость $\Phi(U)$ имеет вид

$$\Phi = \Phi_0 e^{\frac{eU}{nkT}}, \quad (10)$$

где $n \approx 1$. Это свидетельствует о том, что излучение связано с инжекционной составляющей прямого тока. При повышении уровня инжекции (при значении тока > 10 мА) зависимость ослабляется, что можно объяснить влиянием последовательного сопротивления.

На рис. 7 представлена температурная зависимость интенсивности излучения для светодиода на основе GaInAsP при различных значениях тока. При фиксированном значении тока ($I > 3$ мА) изменение интенсивности электролюминесценции с температурной не зависит от уровня возбуждения (ход кривых одинаков). Интенсивность излучения возрастает с повышением уровня возбуждения. При высоких температурах происходит уменьшение интенсивности излучения, связанное с термоионизацией дырок на акцепторном уровне с глубиной залегания $\Delta E \approx 0,1$ эВ. Таким образом, энергия активации температурного гашения интенсивности электролюминесценции составляет порядка 0,10 эВ. При уменьшении уровня инжекции температурная нестабильность тока увеличивается.

При низких уровнях инжекции на некоторых образцах GaInAsP-диодов наблюдается немонокотность температурной зависимости интенсивности излучения. На рис. 8 представлены ваттамперные характеристики светодиода при температурах 300 и 77 К, иллюстрирующие данное явление. Из рисунка видно, что аномальная температурная

зависимость интенсивности излучения (увеличение лучистого потока при повышении температуры) наблюдается при низких уровнях инжекции, когда функция $\Phi(I)$ резко сверхлинейная, т.е. когда излучательная компонента тока составляет незначительную долю от полного тока.

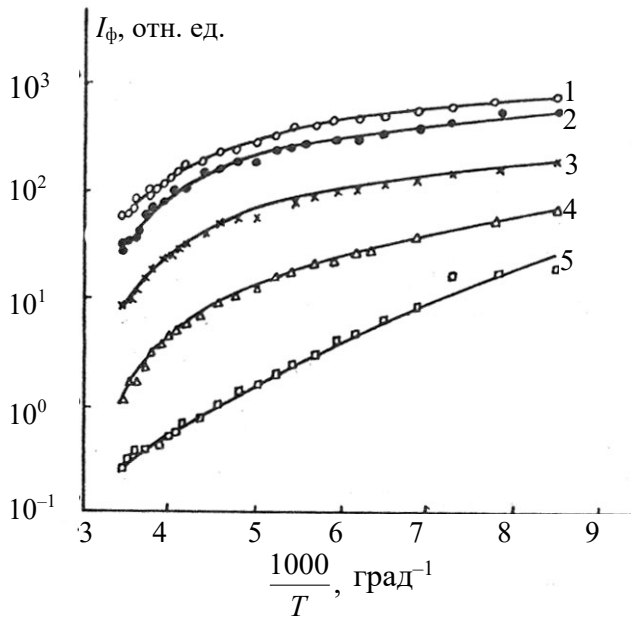


Рисунок 7 – Температурная зависимость интенсивности излучения светодиода на основе GaInAsP при различных значениях тока: 1 – 30 мА; 2 – 20 мА; 3 – 10 мА; 4 – 5 мА; 5 – 3 мА

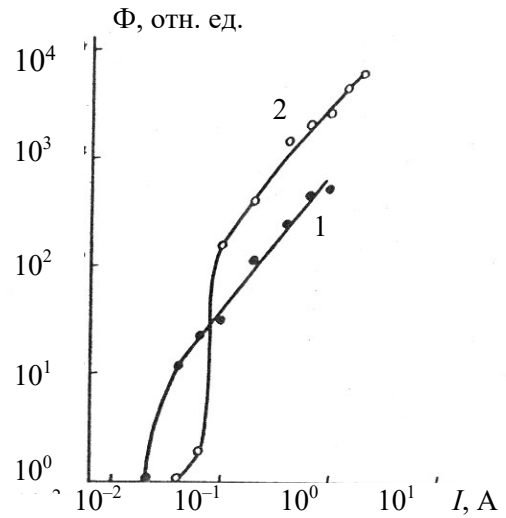


Рисунок 8 – Ваттамперная характеристика излучения светодиода при температурах: 1 – 300 °К; 2 – 77 °К

Для выяснения механизма деградации светодиодов изучалось влияние токовой тренировки на вольтамперные характеристики диодов, на ваттамперные и ваттвольтные характеристики электролюминесценции. После тренировки образцов в течение 1000 час. измерялось изменение фототока p - n -переходов, вызванного освещением неразложившимся светом от лампы накаливания. Для предотвращения влияния старения лампы накаливания величина фототока исследованных образцов сравнивалась с фототоком кремниевого фотодиода малой площади, помещаемого вместо образца. На рис. 9 показана кинетика изменения мощности излучения и фототоков излучателей на основе GaInAsP. Уменьшение интенсивности излучения при высоких уровнях инжекции согласуется с изменением фототока. Однако на многих светодиодах также наблюдалось существенные изменения фототока, связанное с изменением токов утечки. Уменьшение сопротивления утечки снижает величину фототока.

Следует отметить, что кинетика деградации различна для разных образцов, особенно при повышенной температуре и при измерениях в режиме низких уровней инжекции. Это связано с влиянием изменений времени жизни неосновных носителей заряда и безызлучательных компонент тока в процессе деградации. Соотношение излучательной и безызлучательных компонент тока в p - n -переходах зависит от уровня инжекции. Изменение этого соотношения должно намного больше сказываться при низких уровнях инжекции, чем при высоких. В то же время изменения соотношения излучательного и безызлучательного времени жизни электронов должны одинаково сказываться на величине квантового выхода излучения и при высоких, и при низких уровнях инжекции. Удовлетворительное согласие изменений средних значений $\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$ при низких и высоких уровнях инжекции, наблюдаемое

во всех режимах деградации диодов на основе GaInAsP, свидетельствует о том, что эти изменения связаны с изменением времени жизни электронов, инжектированных в *p*-область.

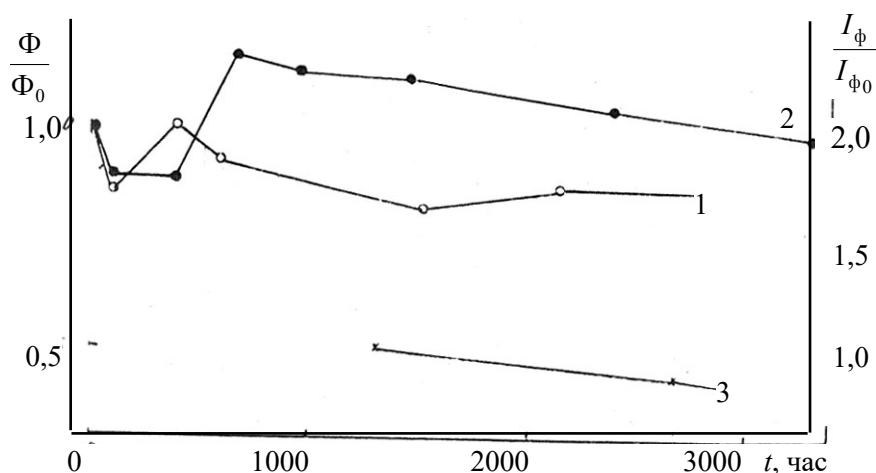


Рисунок 9 – Кинетика изменения мощности излучения, измеренной при значениях тока 10 мА (1) и 2 А (2) и фототока (3) диода на основе GaInAsP

С другой стороны, увеличение разброса данных при уменьшении уровня инжекции свидетельствует о том, что беспорядочное, различное у разных образцов, изменение интенсивности излучения при низких уровнях инжекции обусловлено изменением величины безызлучательной компоненты тока. Тренировка диодов в течение 1000 час. приводит к некоторой стабилизации $\frac{\Phi(t)}{\Phi_0}$, однако не гарантирует от дальнейших изменений квантового выхода.

В заключение можно сказать следующее. *p-n*-переходы в структурах на основе GaInAsP линейны, что связано с большой подвижностью активаторной примеси – цинка. В исследованных излучателях концентрация примесных центров в неоднородностях *p-n*-переходов настолько велика, что величина обратного тока ограничивается лишь сопротивлением растекания носителей заряда. Для большинства излучателей постоянство квантового выхода при изменении величины смещения имеет место при значениях тока более 100 мА, достижимых лишь в импульсных режимах питания. При достаточно высоких плотностях тока, когда величина тока определяется рекомбинацией носителей заряда в квазинейтральных областях и в области объемного заряда *p-n*-перехода, температурная зависимость квантового выхода излучения обусловлена изменением концентрации дырок, локализованных на энергетических уровнях акцептора. При низких плотностях тока, когда существенны утечки, изменение температуры приводит к изменению соотношения между излучательной и безызлучательной компонентами тока. Стабильность излучателей, работающих на постоянном токе в режиме низкого уровня инжекции, можно увеличить за счет предотвращения появления неоднородностей, ответственных за токи утечки. Повышение плотности постоянного рабочего тока приводит к усилению деградации излучателей. Такой же эффект оказывает повышение температуры. Для повышения эффективности излучающих диодов на основе GaInAsP при низких уровнях инжекции необходимо уменьшить токи утечки, связанные с локальными сужениями области объемного заряда в *p-n*-переходах. Основным путем повышения эффективности и надежности излучающих диодов на основе GaInAsP является снижение плотности дислокации в гетероструктурах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Берг А. Светодиоды /А. Берг, П. Дин – М.: Мир, 1973. – 686 с.
2. Викулин И.М. Безызлучательная рекомбинация в излучающих *p-n*-переходах. Обзор по электронной технике / И.М. Викулин, В.И. Ирха. – Одесса, 1996. – 47 с.
3. Borsch V.I. Interaction of parameters in degradation of optoelectronic devices as interaction of parameters in composite system /V.I. Borsch, V.I. Irkha // Photoelectronics. – 2001. – N 10. – P. 84–86.
4. Irkha V.I. Qualitative – correlation model of a degradation of optoelectronic devices / V.I. Irkha, G.V. Makarenko // Photoelectronics. – 2000. – N 9. – P. 73–77.
5. Ирха В.И. Пути повышения эффективности и надежности излучающих диодов на основе GaInAsP / В.И. Ирха //73 науч.-техн. конф. ОНАС им. А.С. Попова, 12-14 декабря 2018: тезисы докл. – Одесса, 2018. – Ч. 1. – С. 23–24.
6. Птащенко А.А. Деградация светоизлучающих диодов. (Обзор) /А.А. Птащенко // Журнал прикладной спектроскопии. – 1980. – Т. 33. – N 5. – С. 781–803.
7. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов /И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1998. – 264 с.

REFERENCES:

1. Berg A. «LEDs». M.: Mir, 1973. 686 p.
2. Vikulin I.M., Irkha V.I. «The nonradiating recombination in emitting *p-n*-junctions. The Survey paper on an electronic technique». Odessa: USAC, 1996. 47 p.
3. Borsch V.I., Irkha V.I. «Interaction of parameters in degradation of optoelectronic devices as interaction of parameters in composite system». «Photoelectronics» N10 (2001); 84–86.
4. Irkha V.I., Makarenko G.V. «Qualitative – correlation model of a degradation of optoelectronic devices» «Photoelectronics» N9 (2000); 73–77.
5. Irkha V.I. «Ways to improve the efficiency and reliability of emitting diodes based on GaInAsP» Proceedings of 73 scientific–techn. conf. ONAZ named by O.S. Popova, 12-14 Decem. 2018: Thesis. Odessa, 2018. V.1; 23–24.
6. Ptashchenko A.A. «Degradation of light emitting diodes. (Review)». Journal of Applied Spectroscopy. N 5 (1980). V. 33; 781–803.
7. Vikulin I.M., Stafeev V.I. «Physics of Semiconducting Devices». M.: Radio and communications, 1998. 264 p.

DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-1-12-22