

УДК 621.315.592

## ДЕГРАДАЦИЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Ирха В.И.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

## ДЕГРАДАЦІЯ ЕЛЕКТРОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ БАГАТОШАРОВИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПІД ДІЄЮ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Ирха В.И.*

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

## ELECTROLUMINESCENCE OF MULTILAYER HETEROSTRUCTURES DEGRADATION BY THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION

*Irkha V.I.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

**Аннотация.** Проведено исследование деградации излучающих многослойных гетероструктур под действием  $\gamma$ -излучения  $\text{Co}^{60}$ . Изучены изменения вольтамперных характеристик таких структур, спектры в излучения, ваттамперных и вольтваттных характеристик коротковолновой и длинноволновой полос электролюминесценции в процессе радиационной деградации. Показано, что использование повторного излучения для повышения квантовой эффективности многослойных гетероструктур уменьшает радиационную стойкость светодиодов.

**Ключевые слова:** деградация, многослойные гетероструктуры,  $\gamma$ -излучения, вольтамперные, ваттамперные и вольтваттные характеристики, спектр излучения, электролюминесценция, квантовая эффективность.

**Анотація.** Проведено дослідження деградації випромінюючих багат шарових гетеро- структур під дією  $\gamma$ -випромінювання  $\text{Co}^{60}$ . Вивчені зміни вольтамперних характеристик таких структур, спектрів випромінювання, ваттамперних та вольтваттних характеристик короткохвильової та довгохвильової смуг електролюмінесценції в процесі радіаційної деградації. Показано, що використання повторного випромінювання для підвищення квантової ефективності багат шарових гетероструктур зменшує радіаційну стійкість світлодіодів.

**Ключові слова:** деградація, багат шарові гетероструктури,  $\gamma$ -випромінювання, вольтамперні, ваттамперні та вольтваттні характеристики, спектр випромінювання, електролюмінесценція, квантова ефективність.

**Abstract.** Research degradation of radiating multilayer heterostructures by the action of  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$ -radiation was made. The volt-ampere characteristics, radiation spectra, wattampere and voltwatt characteristics of short-wave and long-wavelength bands of electroluminescence in the radiation degradation process of such structures were studied. It is shown that the use of repeated radiation to increase the quantum efficiency of multilayer heterostructures reduces the radiation resistance of the LEDs.

**Key words:** degradation, multilayer heterostructures,  $\gamma$ -radiation, volt-ampere, wattampere and voltwatt characteristics, radiation spectrum, electroluminescence, quantum efficiency.

---

*Ирха В.И.*

5

В последнее время проблемы влияния радиации на электрофизические свойства материалов, характеристики, надежность и стабильность работы приборов полупроводниковой электроники стали весьма актуальными в связи с высокой чувствительностью полупроводников и полупроводниковых приборов к воздействию радиации. В процессе облучения свойства полупроводниковых материалов и изготовленных на их основе приборов претерпевает существенные изменения вследствие возникновения различного рода радиационных дефектов, изменяющих концентрацию, подвижность, время жизни носителей заряда. Эффективность радиационного воздействия в большой мере зависит от степени совершенства исходного материала, характера его легирования, структуры *p-n*-перехода и т.д. При облучении в полупроводниковых элементах и устройствах имеют место радиационные эффекты, приводящие к изменению параметров приборов, сокращению сроков их работы, сбоям и выходу из строя [1].

В современных научных работах показана сложность процессов, происходящих при взаимодействии излучения с кристаллами [2-5]. В процессе облучения могут иметь место эффекты смещения и ионизации. Эффект смещения связан с выбиванием налетающей частицей атома из его нормального положения в кристаллической решетке с образованием простейшего типа дефектов – междоузельного атома и вакансии. Эффект ионизации представляет собой процесс выбивания орбитальных электронов из атомов и образования заряженных ионов и свободных электронов.

Изменение характеристик полупроводниковых приборов, обусловленных смещением атомов, относят к необратимым эффектам. Ионизация же обуславливает появление обратимых изменений, если она происходит в объеме кристалла и полупроводниковых изменений характеристик приборов, если ионизация происходит вблизи поверхности кристалла или границ раздела слоев металла, диэлектрика и полупроводника [2].

Образующиеся в результате смещения первичные радиационные нарушения, концентрация которых пропорциональна интегральному потоку излучения, трансформируются затем в более сложные радиационные дефекты. Процессы образования, накопления и перестройки дефектов зависят от ряда факторов, таких как вид и энергия излучения, температура облучения, тип химических примесей в кристалле. Наличие в кристаллической решетке полупроводникового кристалла различных по своей природе радиационных дефектов обуславливает появление в запрещенной зоне спектра дополнительных энергетических уровней.

Радиационные дефекты могут находиться в различных зарядовых состояниях и выступать как центры рекомбинации, уменьшая время жизни неосновных носителей заряда, или как центры захвата, снижая их концентрацию, а так же как рассеяния, уменьшая подвижность носителей заряда.

Изучение влияния проникающего излучения на свойства светодиодов, работающих в поле действия радиации, поможет создать радиационностойкие светодиоды. Проникающая радиация позволяет контролируемо вводить определенное число дефектов в кристаллы для выяснения вопросов о влиянии дефектов на свойства полупроводников.

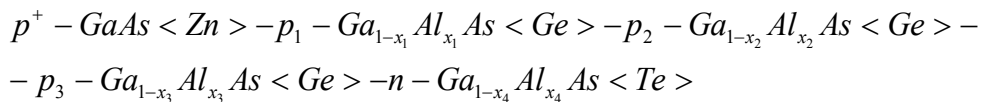
**Цель данной статьи** – дополнить имеющиеся публикации исследования деградации электролюминесценции многослойных гетероструктур под действием ионизирующего излучения, используемых при создании светодиодов.

Многослойные гетероструктуры (МГС) на основе *GaAs* – *GaAlAs*, используемые в светоизлучающих диодах (СИД), обладают рядом преимуществ. Наличие промежуточных слоев *GaAlAs* между *GaAs*-подложкой и активной *GaAlAs*-областью способствует повышению квантового выхода излучения за счет уменьшения дефектности активного слоя. Повторное излучение фотонов узкозонным слоем, находящимся между активной областью и подложкой, существенно повышает общую интенсивность излучения. Пространственное разделение указанного слоя и активной области способствует повышению деградационной

стойкости МГС. Использование МГС позволяет разделить деградиционные процессы, связанные с перераспределением электрического поля и с рекомбинацией носителей заряда в МГС.

Особенности механизма генерации фотонов в МГС приводят к особенностям радиационной деградации данных структур. Облучение относительно небольшими дозами  $\gamma$ -квантов  $Co^{60}$  позволяет контролируемо вводить безызлучательные центры рекомбинации в активную область МГС и в другие слои, участвующие в процессах генерации и вывода фотонов. Излучение характеристик МГС при  $\gamma$ -облучении необходимо для прогнозирования изменений параметров излучающих МГС при неконтролируемых вариациях концентрации безызлучательных центров в процессе изготовления данных структур. Литературные данные о радиационной стойкости МГС практически отсутствуют.

Исследованные образцы имели структуру



при  $x_1 = 0,5 \dots 0,6$ ;  $x_2 = 0,28 \dots 0,33$ ;  $x_3 = 0,11 \dots 0,13$ ;  $x_4 = 0,22 \dots 0,25$ . Толщины слоев  $GaAlAs$  составляли соответственно 4,2; 6,3; 4,2; 7,3 мкм. Так как диффузионная длина для электронов в  $GaAlAs$  порядка 10 мкм и рекомбинация электронов может происходить в  $p$ -слое толщиной в 2...3 диффузионных длины, то для ограничения рекомбинации вблизи  $p$ - $n$ -перехода к слою с  $x_3$  примыкает более широкозонный слой с  $x_2$ . На границе этих слоев возникает потенциальный барьер и рекомбинация осуществляется в тонком слое. Исследованные структуры получены эпитаксиальным наращиванием слоев из растворов-расплавов с различным содержанием  $Al$  и легирующих примесей на подложки  $p^+ - GaAs < Zn >$ .

Растворы-расплавы для получения слоев 1–3 содержали германий в концентрациях 0,3...0,5 атомных процентов, а для слоя 4 – 0,006 атомных процентов теллура. Образцы снабжались омическими контактами. Вывод излучения осуществляется через  $n$ -область.

Спектр электролюминесценции МГС содержит две полосы: коротковолновую (К) и длинноволновую (Д). Д-полоса связана с рекомбинацией в узкозонном слое электронов и дырок, генерированных за счет поглощения К-фотонов. Облучение СИД  $\gamma$ -фотонами производилось на кобальтовой установке КУ-60000 при комнатной температуре.

Дозы облучения  $\gamma$ -квантами составляли  $10^{16} \dots 10^{18}$  квантов/см<sup>2</sup>.

Как указывалось выше, в процессе облучения свойства полупроводниковых материалов и изготовленных на их основе приборов претерпевает существенные изменения вследствие возникновения радиационных дефектов, изменяющих концентрацию, подвижность и время жизни неосновных носителей заряда. В связи с этим при облучении наблюдается деградация электролюминесценции МГС.

Проведенный анализ влияния радиационного облучения на вид вольтамперных характеристик МГС на основе  $GaAlAs$  показал, что имеется несколько наклонов. Это свидетельствует об изменении механизма прохождения тока через гетеросветодиод по мере повышения уровня инжекции.

В большинстве исследованных структур при малых значениях тока порядка  $10^{-7} \dots 10^{-5} A$  прямая ветвь вольтамперной характеристики хорошо описывается туннельным механизмом прохождения тока, когда

$$I \sim I_0 \exp(\alpha u), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – показатель степени не зависящий от температуры. В этой области токов после облучения структуры наблюдается некоторое изменение вольтамперной характеристики (ВАХ), связанное с возрастанием туннельного тока вследствие незначительного изменения концентрации глубоких уровней.

Возрастание тока ( $10^{-5} \dots 10^{-3} A$ ) приводит к появлению в ВАХ участка, связанного с прохождением рекомбинационной составляющей тока. На этом участке характеристики зависимость прямого тока от приложенного напряжения хорошо описывается зависимостью

$$I \sim \exp\left(\frac{eU}{nkT}\right). \quad (2)$$

Коэффициент  $n$  в рассмотренных образцах менялся в пределах 1,68...1,73. Облучение структуры  $\gamma$ -квантами интенсивностью  $5 \cdot 10^{16}$  квант/см<sup>2</sup> приводит к параллельному сдвигу характеристики в область большого значения тока. Такие изменения ВАХ структур после облучения связаны с уменьшением времени жизни неосновных носителей заряда [6]. Время жизни неосновных носителей заряда в исследованных структурах имеет две составляющие – излучательную ( $\tau_n$ ), определяемую концентрацией мелких легирующих примесей, и безызлучательную ( $\tau_0$ ), обусловливаемую дефектами структуры. Обратная величина общего времени жизни есть сумма обратных величин этих времен:

$$\tau^{-1} = \tau_n^{-1} + \tau_0^{-1}. \quad (3)$$

При облучении материала светодиода частицами высоких энергий в объем структуры вводится количество дефектов структуры, являющихся эффективными центрами рекомбинации, что и приводит к снижению времени жизни.

Выражение для радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда можно записать в виде [2]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{\Phi}{K}, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  – время жизни неосновных носителей заряда до облучения;  $\Phi$  – интегральный поток облучения;  $K$  – коэффициент радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда. Этот коэффициент зависит от вида и условий облучения, энергии бомбардирующих частиц, типа проводимости, положения уровня Ферми, сечения захвата и энергетического положения радиационных дефектов. Величина  $1/K$  не зависит от типа донорной примеси и ее концентрации в пределах от  $5 \cdot 10^{17}$  до  $8 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Используя значение  $1/K$  для исследуемых материалов на основе *GaAlAs*, можно было бы с помощью формулы 4 получить величину времени жизни неосновных носителей заряда. Экспериментально изменение времени жизни неосновных носителей заряда при  $\gamma$ -облучении определялось используя участок ВАХ СИД, соответствующий прохождению рекомбинационной составляющей тока.

Поскольку в исследованных структурах рекомбинация неосновных носителей заряда происходит в толстой  $p_3$ -области ( $d \approx 2$  мкм), то при преобразовании рекомбинационной составляющей тока в такой  $p$ - $i$ - $n$ -структуре имеет место зависимость

$$I_r = \frac{\pi e n_i}{2 \sqrt{\tau_{n_0} \cdot \tau_{p_0}}} \left( \frac{kT}{eE} \right) e^{\frac{eu}{2kT}}, \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $I_r$  – плотность рекомбинационного тока;  $n_i$  – собственная концентрация носителей. Используя (5) при значениях  $n_i = 1,3 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup> и площади  $p$ - $n$ -перехода  $S = 10^{-3}$  см<sup>2</sup> были найдены значения времени жизни неосновных носителей заряда до деградации и после деградации, которые составляли  $1,66 \cdot 10^{-9}$  с и  $1,43 \cdot 10^{-9}$  с.

На рис. 1 и 2 приведена часть ВАХ одного из исследованных образцов, построенная в координатах  $I(U)$  и  $I^{1/2}(U)$  в области токов  $10^{-3} \dots 10^{-2} A$ . Анализ этих зависимостей показывает, что на графике  $I(U)$  в области токов  $4 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2} A$  наблюдается спрямление ВАХ. При этих уровнях возбуждения, когда падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе  $U_1$  сравнимо с падением напряжения в  $p_3$ -области  $U_2$ , наблюдается омический участок ВАХ. Облучение образцов приводит к параллельному сдвигу рассматриваемого участка характеристики в область больших значений тока, что связано с изменением концентрации безызлучательных центров [6].

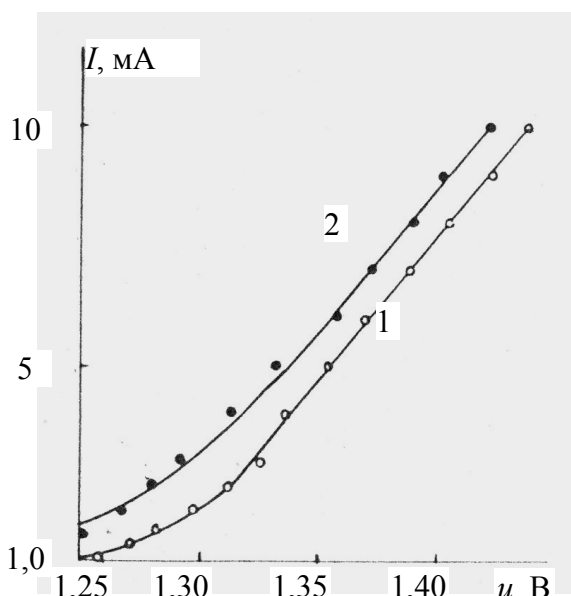


Рисунок 1 – Вольтамперная характеристика МГС на основе *GaAlAs* до (1) и после (2) облучения  $\gamma$ -квантами в координатах  $I(U)$  в области токов  $10^{-3} \dots 10^{-2} A$

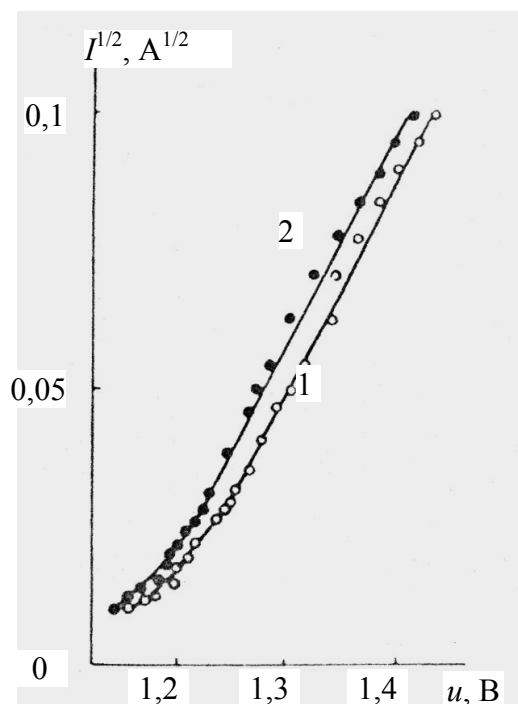


Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика МГС на основе *GaAlAs* в координатах  $I^{1/2}(U)$  до (1) и после (2) облучения  $\gamma$ -квантами

Омический участок характеристики при больших плотностях тока сменяется более сильной зависимостью прямого тока от напряжения. Измерение ВАХ в этих областях токов ( $10^{-2} \dots 1 A$ ) проводилось при пропускании через структуру прямоугольных импульсов тока длительностью 6 мкс. Графическое представление этой части кривой в масштабе  $I(U)$  (рис. 3) и в масштабе  $I^{1/2}(U)$  (рис. 4) показывает, что в этой области возбуждений прямая ВАХ описывается закономерностью

$$I \sim (U - U_0)^2, \quad (6)$$

где  $U_0$  – падение напряжения на константах.

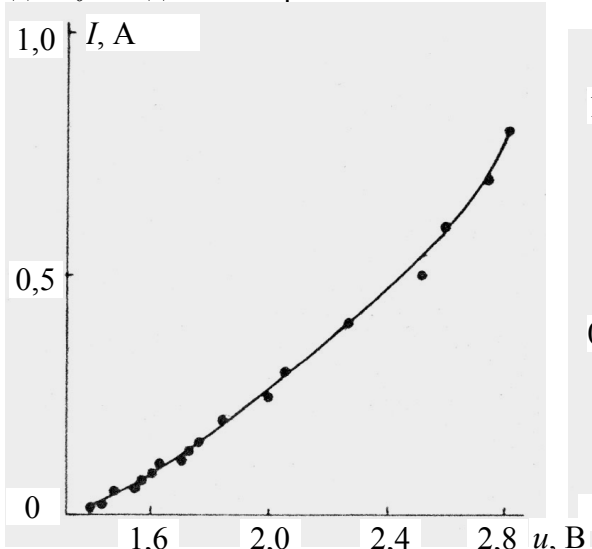


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика образца на основе *GaAlAs* после деградации при высоких уровнях возбуждения в координатах  $I(U)$

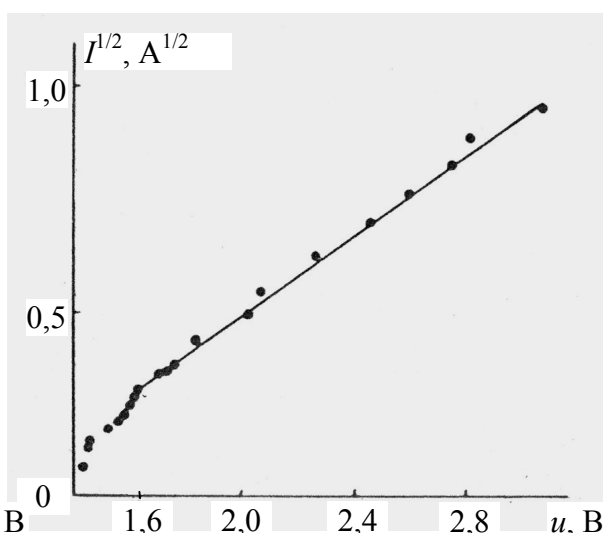


Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика образца на основе *GaAlAs* после деградации при высоких уровнях возбуждения в координатах  $I^{1/2}(U)$

При исследовании обратных ВАХ до и после  $\gamma$ -облучения наблюдалось некоторое увеличение обратного тока после облучения образцов.

Исследование лавинного пробоя показало, что напряжения лавинного пробоя колебались в пределах 6,9...12,5 В, причем облучение структуры не приводит к их изменению. Это является доказательством того, что используемые нами интенсивности облучения  $\gamma$ -квантами ( $5 \cdot 10^{16}$  квант/см<sup>2</sup>) еще не приводят к существенным изменениям концентрации примеси. Полученные результаты согласуются с литературными данными [7, 8], где показано, что практически полное подавление интенсивности люминесценции, а значит, резкое снижение времени жизни неравновесных носителей в облученном GaAs наблюдается при таких интересных потоках облучения, при которых изменения концентрации и подвижности носителей заряда только начинают проявляться.

На рис. 5 приведены спектры электролюминесценции МГС до (1) и после (2)  $\gamma$ -облучения. Как видно из рисунка спектры до облучения представлены двумя полосами излучения. Д – полоса излучения обусловлена переизлучением К-компоненты. Для всех рассмотренных образцов максимумы полос излучения соответствуют энергии 1,61 и 1,48 эВ. Облучение образцов приводит к резкому уменьшению интенсивности Д – компоненты спектра и некоторому уменьшению К-полосы (кривая 2). Но при этом не изменяется полуширина полосы излучения и не наблюдается смещение максимума излучения. Радиационное облучение, создающее внутри структуры дефекты, способствует появлению в запрещенной зоне энергетических уровней, что могло бы также способствовать появлению в спектре излучения новых дополнительных полос. Отсутствие этих полос, по -видимому, является доводом в пользу того, что радиационные нарушения являются безызлучательными рекомбинационными центрами, снижающими эффективность излучательных каналов рекомбинации. Облучение не влияет на основной механизм генерации рекомбинационного излучения.

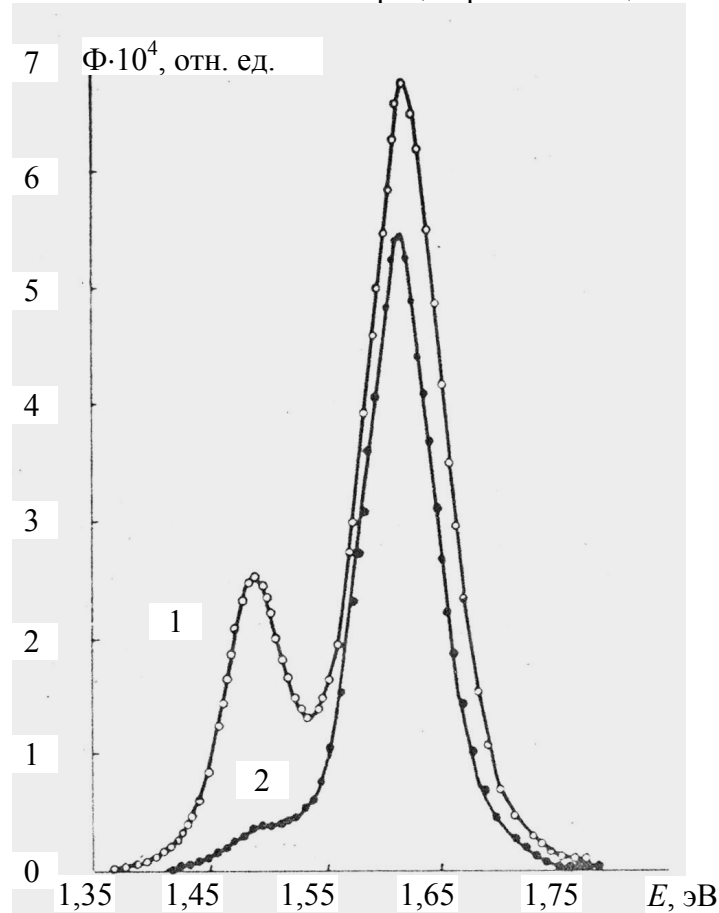


Рисунок 5 – Спектр электролюминесценции МГС на основе GaAlAs до (1) и после (2) облучения  $\gamma$ -квантами

Анализ люменвольтовых и люменамперных характеристик МГС до и после  $\gamma$ -облучения показывает, что как уже отмечалось ранее, происходит гашение длиноволновой полосы излучения при облучении образцов. Облучение структур не приводит к изменению наклона характеристик ( $\sim 1$ ), а совместное их рассмотрение с ВАХ позволяет утверждать, что излучательная рекомбинация наблюдается в той же области структуры, в которой происходит общая рекомбинация, ответственная за протекание тока.

В заключение можно сказать следующее: использование повторного излучения фотонов для повышения квантовой эффективности в МГС, которые могут подвергаться действию ионизирующих излучений, нецелесообразно, так как повторное излучение резко уменьшает радиационную стойкость излучающих диодов. При  $\gamma$ -облучении уменьшается интенсивность электролюминесценции МГС. Особенно существенно падает интенсивность Д-полосы излучения, связанной с переизлучением фотонов в  $p_1$ -слое. Соотношение скоростей деградации К и Д полос излучения свидетельствует о том, что скорость радиационного введения безызлучательных центров в  $Ga_{1-x}Al_xAs$  при  $x = 0,3 \dots 0,6$  приблизительно постоянна.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Вавилов В.С. Действие излучения на полупроводники / Вавилов В.С. – М.: Физматгиз, 1963. – 264 с.
2. Коршунов Ф.П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах / Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.И. – Минск: Наука и техника, 1978. – 236 с.
3. Викулин И.М. Высокочувствительные дозиметры на основе полевых и однопереходных транзисторов / И.М. Викулин, А.В. Веремьева, В.Э. Горбачев, П.Ю. Марколенко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – 2016. – № 2. – С. 51-54.
4. Винецкий В.Л. Радиационная физика полупроводников / В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. – К.: Наук. думка, 1979. – 336 с.
5. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / [Кулаков В.М., Ладыгин Е.А. и др.]; под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
6. Ирха В.И. Влияние  $\gamma$ -облучения на характеристики излучающих оптоэлектронных элементов / В.И. Ирха, А.Р. Коваль // Праці УНДІРТ. – 2002. – № 4 (32). – С. 20-23.
7. Irkha V. About expediency of use of the reemission of photons for increasing light intensity of multilayer LEDs that can be exposed of radiation / V. Irkha, V. Gorbachev // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Thesis of the X<sup>th</sup> International Conf. TCSE2010, 23-27 February 2010. – Lviv – Slavske. – 2010. – P. 356.
8. Irkha V. Degradation of Light – Emitting Diodes on the Basis of Semiconductors of A3B5 by Influence  $\gamma$ -Irradiation / V. Irkha, P. Markolenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Thesis of the X<sup>th</sup> International Conf. TCSE2010, (23-27 February 2010). – Lviv – Slavske, 2010. – P. 366.

#### REFERENCES:

1. Vavilov V.S. Effect of radiation on semiconductors / Vavilov V.S. – Moscow: Fizmatgiz, 1963. – 264 p.
2. Korshunov F.P. Radiation effects in semiconductor devices / Korshunov F.P., Gatalsky G.V., Ivanov G.I. – Minsk: Science and Technology, 1978. – 236 p.
3. Vikulin I. Migly sensitive dosimeters based on field – effect and unijunction transistors / I. Vikulin, A. Veremjeva, V. Gorbachev, P. Markolenko // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. – 2016. – № 2. – P.51-54.
4. Vinetsky V.L. Radiation Physics of Semiconductors / V.L.Vinetsky, G.A. Cholodar. – K.: Science. Dumka, 1979. – 336 p.
5. Effect of penetrating radiation on electronic products / [Kulakov V.M., Ladygin E.A. and others]; Ed. E.A. Ladygin. – Moscow: Sov. radio, 1980. – 224 p.
6. Irkha V. The Influence of  $\gamma$ -irradiation on the Characteristics of the optoelectronic Elements / V. Irkha, A. Koval // Pratsi UNDIRT. – 2002. – № 4(32). – P.20-23.
7. Irkha V. About expediency of use of the reemission of photons for increasing light intensity of multilayer LEDs that can be exposed of radiation / V. Irkha, V.Gorbachev// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Thesis of the X<sup>th</sup> International Conf. TCSE2010, 23-27 February 2010. – Lviv – Slavske. – 2010. – P. 356.
8. Irkha V. Degradation of Light – Emitting Diodes on the Basis of Semiconductors of A3B5 by Influence  $\gamma$ -Irradiation / V. Irkha, P. Markolenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Thesis of the X<sup>th</sup> International Conf. TCSE2010, (23-27 February 2010). – Lviv – Slavske, 2010. – P. 366.