

# Исследование электрофизических свойств излучающих GaAs-, GaP- и $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ – p–n-структур с помощью моделирования

Н.Л. Лагунович

ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск,  
n\_dudarby@tut.by

**Аннотация** — Целью данной работы были разработка одномерных моделей структур с p–n-переходом, получаемых на основе GaAs, GaP и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ , и исследование их электрофизических свойств и излучательных характеристик методом моделирования. Выполнено приборное моделирование таких структур с помощью разработанной автором программы MOD-1D, которая дала возможность рассчитать и построить зависимости интенсивности излучения исследуемых диодных структур от координаты и получить зависимости положения максимума интенсивности их излучения от напряжения, прикладываемого к p–n-переходу. Установлено, что при низких уровнях инжекции максимум интенсивности излучения смещается от границы p–n-перехода в область с более высоким уровнем концентрации примеси, а в условиях высокого уровня инжекции с ростом напряжения смещения, прикладываемого к p–n-переходу, дальнейшее смещение максимума интенсивности излучения почти прекращается и становится незначительным.

**Ключевые слова** — p–n-переход, полупроводниковая светоизлучающая структура, приборное моделирование, прямое падение напряжения, интенсивность излучения, уровень инжекции.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время различные типы структур с p–n-переходом [1]–[3] (диодов [1], [2], [4], светодиодов [5]–[7], стабилитронов [8], биполярных транзисторов [1], [2] и т. д.) находят широкое применение, как в качестве дискретных приборов, так и в составе интегральных микросхем различного назначения, а их моделирование занимает важное место при разработке и оптимизации технологии изготовления новых изделий электронной техники, содержащих приборы с p–n-переходом. Моделирование [9], [10] позволяет решить задачу получения конкретных приборов с заданными электрофизическими свойствами и электрическими характеристиками ещё до этапа изготовления их экспериментальных образцов. При работе светоизлучающих полупроводниковых структур [5], [6], которыми являются исследуемые в данной работе GaAs-, GaP- и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ -диодные структуры, помимо основных параметров их вольт-амперных характеристик интерес представляют также их излучательные характеристики, такие как интенсивность излучения. В данной работе ставилась задача исследовать поведение GaAs-, GaP- и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ -диодных структур при различных уровнях инжекции через p–n-переход.

Целью работы было разработать одномерные модели полупроводниковых p–n-структур, получаемых на основе GaAs, GaP и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ , выполнить их приборное моделирование и определить, как изменятся положения максимумов интенсивности их излучения по глубине с ростом напряжения смещения, прикладываемого к p–n-переходу. Для осуществления приборного моделирования указанных светоизлучающих диодов была использована разработанная автором программа для одномерного приборного моделирования MOD-1D [11], в основе которой заложены разработанные автором модели ряда полупроводниковых структур.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Так как в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» приборы изготавливаются в основном на кремниевых пластинах, в данной работе речь идёт только о моделировании p–n-переходов, получаемых на основе таких материалов, как GaAs, GaP и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ . Моделирование исследуемых структур осуществлялось с использованием программы для одномерного приборного моделирования MOD-1D [11] (программа внедрена и зарегистрирована 21.03.2014 г. под № 125 в Филиале НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»), разработанной автором, и в которой были использованы разработанные автором модели исследуемых полупроводниковых структур. Основу таких моделей составила фундаментальная система уравнений полупроводника (ФСУ) в диффузионно-дрейфовом приближении и в предположении справедливости статистики Больцмана. Решение ФСУ, которое может быть осуществлено только численными методами, выполнялось методом Гуммеля [12]. На каждой итерации численной реализации метода Гуммеля выражения, входящие в состав ФСУ в дискретной форме решались методом Гаусса [13], [14]. Алгоритмы реализации указанных способов решения ФСУ совместно с выражениями, описывающими процессы рекомбинации в полупроводниковой структуре и модели подвижности для электронов и дырок, заложены в основе программы MOD-1D [11].

Серийный выпуск полупроводниковых структур на основе GaAs, GaP и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» отсутствует, однако, освоено се-

рийное изготовление ряда микросхем высоковольтных высокостабильных LED-драйверов (драйверов для светодиодов) типа IZ9910, IZ9921, IZ9922, IL3361 [15] и др. на основе Si, применяемых в качестве источников напряжения, стабилизированного тока для управления светодиодными подсветками в современных энерго-сберегающих системах освещения и рекламно-информационных устройствах.

### III. МОДЕЛЬ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ GaAs-, GaP- и Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As- ДИОДНЫХ СТРУКТУР

В основе работы полупроводниковых светоизлучающих p-n-диодов лежит ряд физических явлений, важнейшими из которых являются инжекция неосновных носителей заряда в активную область структуры и излучательная рекомбинация инжектированных носителей [5]. Одной из задач, решённых в рамках данной работы, была разработка и построение комплекса простых и эффективных с точки зрения времени компьютерного счёта численных одномерных моделей гомогенных излучающих структур на основе GaAs, GaP, Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As, применяемых для создания светодиодов, чувствительных элементов в составе датчиков различного назначения, а также совместно с фотодиодами для создания оптоэлектронных пар.

С целью получения электрофизических параметров и характеристик рассматриваемых структур было выполнено их приборное моделирование, при осуществлении которого с помощью разработанной автором программы MOD-1D [11] применены модели, основу которых составила фундаментальная система уравнений полупроводника (ФСУ) в диффузионно-дрейфовом приближении и в предположении справедливости статистики Больцмана. Алгоритм решения ФСУ составляет основу блока, предназначенного для приборного моделирования полупроводниковых структур, в составе программы MOD-1D.

В состав ФСУ в диффузионно-дрейфовом приближении входят:

- уравнение Пуассона

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (p - n + N_d - N_a), \quad (1)$$

где  $\phi$  – электростатический потенциал;  
 $x$  – значение координаты вдоль направления  $X$ ;  
 $p, n$  – концентрации электронов и дырок, соответственно;  
 $q$  – заряд электрона;  
 $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  
 $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $N_d$  – концентрация доноров;  
 $N_a$  – концентрация акцепторов;

- и уравнения непрерывности для электронов и дырок

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - q(R - G) - q \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где  $J_n$  и  $J_p$  – электронная и дырочная составляющие тока;

$t$  – время;

$R$  и  $G$  – скорости рекомбинации и генерации носителей заряда, соответственно.

$J_n$  и  $J_p$  в выражениях (2) и (3) задавались с учётом диффузионной и дрейфовой составляющих следующими выражениями

$$J_n = q n \mu_n E + q \phi_T \mu_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (4)$$

$$J_p = q p \mu_p E - q \phi_T \mu_p \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок;

$E$  – напряжённость электрического поля;

$\phi_T = k_B T / q$  – температурный потенциал;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура кристалла.

Материалы GaAs и Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As при  $x < 0.35$  являются прямозонными полупроводниковыми материалами, а GaP относят к непрямозонным полупроводникам. Предполагается, что основным механизмом рекомбинации в прямозонных полупроводниковых соединениях типа GaAs, Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As, легированных мелкими донорами и акцепторами, является излучательная рекомбинация, которая осуществляется преимущественно за счет прямых излучательных переходов зона – зона и зона – мелкая примесь. Полное число излучательных переходов в единице объема при межзонной рекомбинации  $R$  пропорционально концентрациям свободных электронов и дырок:

$$R = B \cdot (n \cdot p - n_i^2), \quad (6)$$

где  $B$  – коэффициент излучательной рекомбинации;  
 $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике.

Поскольку  $n_i$  в полупроводнике на несколько порядков ниже концентраций  $n$  и  $p$ , ею в выражении (6) можно пренебречь, и тогда получается выражение вида

$$R = B \cdot n \cdot p, \quad (7)$$

Для упомянутых выше полупроводниковых соединений переходы зона - примесь в основном представлены рекомбинацией свободных электронов на мелком акцепторе и совместно с межзонными переходами обеспечивают внутренний квантовый выход близкий к единице. Спектр излучения, обусловленный такими переходами при низком и умеренном легировании, похож на спектр межзонной рекомбинации и поэтому такие переходы можно считать квазимежзонными. Они происходят в результате захвата дырки отрицательно заряженным акцептором и последующего излучательного перехода электрона из зоны проводимости на энергетический уровень данного акцептора. Для соот-

ветствующей скорости рекомбинации в первом приближении также можно воспользоваться выражением (7).

Необходимо отметить, что в общем случае при наличии других каналов рекомбинации, сравнимых или превышающих по скорости излучательный, следует учесть их в качестве дополнительных слагаемых к формуле (7). При наличии глубоких дефектов – центров безызлучательной рекомбинации (например, радиационных дефектов или дефектов структуры) – применяется формула Шокли-Рида-Холла, описывающая рекомбинацию через локальные центры. Данная формула с учётом выражения, учитывающего и описывающего также и Оже-рекомбинацию, выглядит следующим образом:

$$R = (pn - n_i) \left( \frac{1}{\tau_n (p + n_i) + \tau_p (n + p_i)} + c_n \cdot n - c_p \cdot p \right), \quad (8)$$

где  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – времена жизни электронов и дырок, соответственно;

$c_n$  и  $c_p$  – коэффициенты Оже-рекомбинации.

Модели подвижностей носителей заряда  $\mu_n$  и  $\mu_p$ , взятые в форме зависимостей от распределения легирующей примеси и напряжённости электрического поля, имели в численной модели исследуемых диодов следующий вид [13]

$$\mu_n = 65 + \frac{1265}{1 + \exp\left(0.72 \cdot \frac{\ln N_{x1}}{8.5 \cdot 10^{16}}\right) \cdot \sqrt{1 + \left|\frac{E_{\text{внутр}}}{8000}\right|^2}}, \quad (9)$$

$$\mu_p = 47.7 + \frac{447}{1 + \exp\left(0.76 \cdot \ln \frac{N_{x1}}{6.3 \cdot 10^{16}}\right) \cdot \sqrt{1 + \left|\frac{E_{\text{внутр}}}{19500}\right|^2}}, \quad (10)$$

где  $N_{x1}$  – распределение концентрации легирующей примеси, имеющее экспоненциальный характер и описываемое выражением (11);

$E_{\text{внутр}}$  – напряжённость внутреннего электрического поля в полупроводниковой структуре, обусловленная градиентом концентраций легирующих примесей.

В формулах (9) и (10) размерность подвижностей  $\mu_n$  и  $\mu_p$  равна  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , а параметров  $N_{x1}$  и  $E_{\text{внутр}}$  –  $1/\text{см}^3$  и  $\text{В}/\text{см}$ , соответственно.

Функция распределения примеси в рассматриваемом случае выбрана в виде, характерном для профилей гауссовского типа, получаемых в результате термической диффузии легирующей примеси [13]:

$$N_{x1} = N_d(x) - N_a(x) = c_d \exp(-x/L_0) - c_a, \quad (11)$$

где  $N_d(x)$ ,  $N_a(x)$  – распределение концентраций доноров и акцепторов, соответственно;

$c_d$  – максимальное значение концентрации доноров;

$c_a$  – значение концентрации акцепторов;

$L_0$  – параметр, задаваемый условием  $N(x_{p-n}) = 0$ , где  $x_{p-n}$  – глубина залегания p–n-перехода.

В основе работы полупроводниковых светоизлучающих диодов лежит ряд физических явлений, важнейшими из которых являются: инжекция неосновных носителей в активную область структуры с электронно-дырочным гомо- или гетеропереходом и излучательная рекомбинация инжектированных носителей в активной области структуры. Процесс инжекции неосновных носителей служит основным механизмом введения неравновесных носителей в активную область структуры светоизлучающих диодов. При этом, как известно, при создании излучающих структур с применением термодиффузии легирующей примеси, а также эпитаксии в области p–n-переходов реализуются достаточно плавные градиенты концентраций носителей заряда, которые можно описать с помощью выражения (11).

Для светоизлучающих приборов одной из важнейших характеристик является их интенсивность излучения [5]. Для расчета зависимости интенсивности излучения  $I$  от координаты  $x$  вдоль структуры, а также других параметров исследуемых структур в работе была использована программа MOD-1D. При построении использованной в данной работе численной модели предполагалось, что подвижности электронов и дырок, описываются выражениями (9), (10), а распределение примеси имеет вид (11). Распределение интенсивности излучения в данном случае определяется уравнением (12), которое может быть записано в виде

$$I(x) = C \cdot n(x) \cdot p(x), \quad (12)$$

где  $C$  – нормирующий коэффициент;

$n(x)$ ,  $p(x)$  – распределения электронов и дырок по структуре, соответственно.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из выражения (12), рассчитываемая интенсивность излучения может быть равна нулю только при нулевых значениях концентраций подвижных носителей заряда, которые в нормальных условиях (при температуре  $T \approx 300$  К) всегда больше нуля. Следовательно, в разработанных в данной работе моделях светоизлучающих структур значение  $I$  при работе приборов в условиях комнатной температуры всегда будет больше нуля. Однако, величина её может быть настолько мала, что она будет неощутима человеческим глазом. Как известно, подвижные носители заряда отсутствуют в объёме полупроводника только при температурах абсолютного нуля ( $T \approx -273$  °С).

Распределения интенсивности излучения по глубине  $I(x)$  исследуемых структур были рассчитаны и построены с применением программы MOD-1D. Результаты расчёта  $I(x)$  в относительных единицах приведены на рисунках 1–3, из которых видно, как меняется распределение интенсивности излучения светодиода с изменением прикладываемого к структуре прямого напряжения смещения для различных материалов. Расчёты выполнялись для случаев, когда общая длина исследуемых структур в направлении моделирования  $X$  составляла 2 мкм, а глубина залегания p–n-переходов была равна 1 мкм.

В частности, из рис. 1 видно, как меняется положение максимума интенсивности излучения  $I_{max}$  по глубине структуры светодиода на основе GaAs. Моделирование такого светодиода и определение положения его  $I_{max}$  было осуществлено при различных прямых напряжениях смещения  $U$ , прикладываемых к р-п-переходу структуры. На рис. 1 приведены зависимости  $I(x)$  при напряжениях  $U$  равных 0.5 В, 0.8 В и 1.5 В. Максимальное смещение  $I_{max}$  по глубине светодиода (0.38 мкм) наблюдалось при величине  $U=1.5$  В. Из рис. 1 также видно, что разница в смещении  $I_{max}$ , полученного при  $U=0.5$  В и  $U=0.8$  В почти отсутствует и близка к нулю.

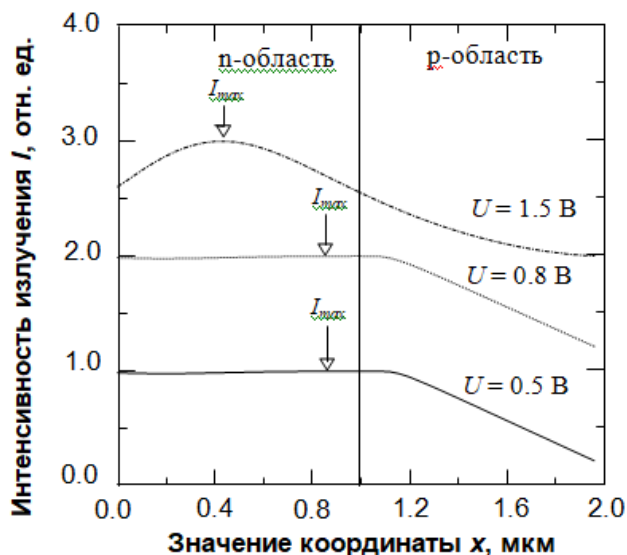


Рис. 1. Зависимости интенсивности излучения светодиодных структур на основе GaAs от координаты  $x$  вдоль структуры, полученные с применением программы MOD-1D

Похожие тенденции в смещении положения  $I_{max}$  наблюдаются и для структур на основе GaP (см. рис. 2) и  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  (см. рис. 3). Из рис. 2 видно, что максимум интенсивности излучения GaP-структуры при низком уровне инжекции неосновных носителей заряда находится на границе р-п-перехода, а при высоких уровнях инжекции смещается в область с более высоким уровнем концентрации примеси п-типа. При прямом напряжении смещения р-п-перехода  $U=3.0$  В (высокий уровень инжекции)  $I_{max}$  также смещается по оси  $X$  приблизительно на 0.38 мкм, как видно из рис. 2. Аналогичная картина наблюдается и для  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ -структуры, у которой  $I_{max}$  при низком уровне инжекции находится вблизи границы р-п-перехода, а при высоком уровне инжекции смещается в область п-типа с более высоким уровнем легирования на расстояние около 0.4 мкм от границы р-п-перехода.

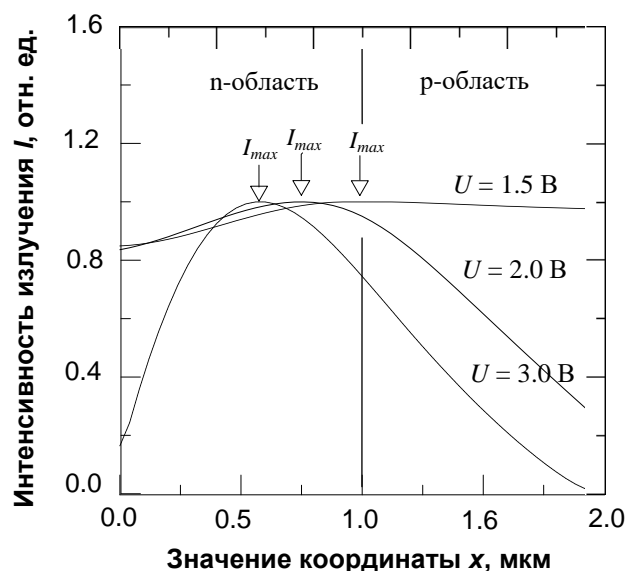


Рис. 2. Зависимости интенсивности излучения светодиодных структур на основе GaP от координаты  $x$  вдоль структуры, полученные с применением программы MOD-1D

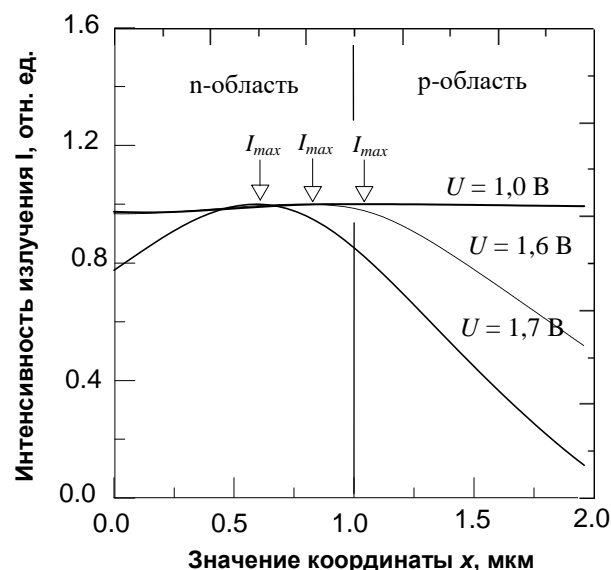


Рис. 3. Зависимости интенсивности излучения светодиодных структур на основе  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  от координаты  $x$  вдоль структуры, полученные с применением программы MOD-1D

Пороговое напряжение исследуемых в данной работе структур различно, т. к. структуры создаются на основе разных полупроводниковых материалов, имеющих определённые значения ширины запрещённой зоны. Следовательно, чтобы открыть р-п-переход на основе  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ , необходимо приложить к нему большее напряжение смещения, чем то, которое нужно для открывания р-п-перехода на основе GaAs, т. к. ширина запрещённой зоны  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  составляет от 1.42 до 2.16 эВ, в то время как данный параметр у GaAs равен 1.42 эВ. Ещё большее напряжение смеще-

ния необходимо подать на р–п-переход, созданный на основе GaP, чтобы открыть его, т. к. ширина запрещённой зоны у данного материала составляет 2.24 эВ. В результате в процессе моделирования на указанные структуры подавались различные диапазоны прямых напряжений смещения, что видно из рис. 1–3, на которых приведены по три распределения интенсивности излучения рассматриваемых диодных структур для трёх различных уровней прямого напряжения, прикладываемого к р–п-переходу, соответствующих как низкому, так и высокому уровням инжекции.

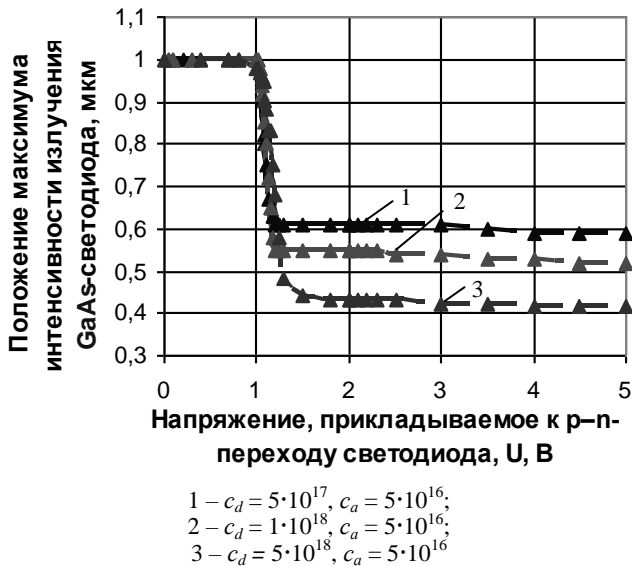


Рис. 4. Зависимости положения максимума интенсивности излучения GaAs-светодиодной структуры от координаты, полученные с применением MOD-1D при различных значениях  $c_d$

Таким образом, как следует из вышесказанного, для светоизлучающих диодов достаточно часто имеет место пространственное изменение положения области с максимумом светимости при изменении тока инжекции.

Дополнительные исследования и расчеты показали, что данный эффект зависит не только от уровней инжекции и свойств материала, но и от градиентов концентраций легирующей примеси, и от её рекомбинационных свойств, что продемонстрировано на рисунках 4 – 6. На указанных рисунках показаны зависимости положения максимума интенсивности излучения GaAs- (рис. 4), GaP- (рис. 5) и  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ -светодиодных структур (рис. 6) от прикладываемых к р–п-переходу прямых напряжений смещения, изменявшихся от 0.5 В до 5 В, при различных значениях концентраций  $c_d$  и  $c_a$  (значение  $c_d$  варьировалось от  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а значение  $c_a$  оставалось постоянным и равным  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

Для повышения чистоты сравнения данных, полученных для различных материалов, расчёты проводились для одинаковых диапазонов прикладываемых к структурам напряжений и одинаковых значений мак-

симальной концентрации доноров  $c_d$  и концентрации акцепторов  $c_a$ .



Рис.5. Зависимости положения максимума интенсивности излучения GaP-светодиодной структуры от координаты, полученные с применением MOD-1D при различных значениях  $c_d$

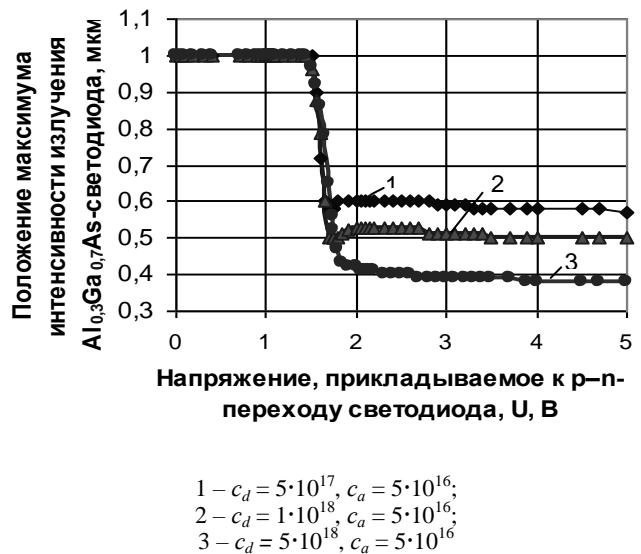


Рис. 6. Зависимости положения максимума интенсивности излучения  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ -светодиодной структуры от координаты, полученные с применением MOD-1D при различных значениях  $c_d$

Как видно из рисунков 4 – 6,  $I_{max}$  находится вблизи границы р–п-переходов, т. е. на глубине около 1 мкм, в условиях низкого уровня инжекции. По мере увеличения прямого напряжения смещения, прикладываемого к исследуемым светодиодным структурам,  $I_{max}$  начинает смещаться по оси X в область с более высоким уровнем концентрации легирующей примеси, причём смещение это происходит довольно резко до момента, когда р–п-переход структуры оказывается открытым и через него начинает течь большой ток. Как видно из рисунков 4 – 6, чем больше градиент концентраций легирующих примесей в n- и p-областях, тем на боль-

шую величину смещается максимум интенсивности излучения светодиодной структуры от границы р–п-перехода. В условиях высокого уровня инжекции смещение  $I_{max}$  продолжается в том же направлении, но на значительно меньшую величину, чем в момент отпирания р–п-перехода, и становится незначительным.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанных автором одномерных моделей исследуемых в работе светодиодных структур на основе GaAs,  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  и GaP с целью выполнения их одномерного приборного моделирования с помощью программы *MOD-1D* (также разработанной автором) позволило снизить затраты машинного времени в 2 – 3 раза по сравнению с затратами необходимыми для случая двумерного моделирования. Для осуществления моделирования была выбрана функция распределения примесей, характерного для профилей гауссовского типа, получаемых в результате термической диффузии легирующей примеси. С применением *MOD-1D* выполнены предварительные оценочные расчёты электрофизических параметров и характеристики р–п-переходов исследуемых светодиодов, а также зависимости интенсивности их излучений от координаты для различных уровней инжекции и градиентов концентраций легирующих примесей в областях n- и p-типа. Были определены тенденции изменения положения  $I_{max}$  приборов для различных уровней инжекции и значений концентраций легирующих примесей в p- и n- областях. Установлено, что при низких уровнях инжекции смещение  $I_{max}$  по глубине структур отсутствует; в условиях высоких уровней инжекции наблюдается незначительное изменение положения  $I_{max}$ ; максимальное изменение положения  $I_{max}$  в область с более высоким уровнем концентрации легирующей примеси наблюдается в момент отпирания р–п-перехода и перехода его в открытое состояние в небольшом диапазоне прикладываемых к структуре прямых напряжений смещения. Данную особенность, незаметную для случаев светодиодных структур с микронными размерами, следует учитывать в случае получения таких структур в наномикронном диапазоне размеров.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 455 с.  
 [2] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.

[3] Лагунович Н.Л. Исследование электрофизических свойств р–п+-перехода с помощью моделирования в декартовой и цилиндрической системах координат // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. Выпуск 1. С. 33-38. doi:10.31114/2078-7707-2021-1-33-38  
 [4] Лагунович Н.Л. Моделирование высоковольтного кремниевого диода, построение зависимостей его плотности тока от температуры // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. Выпуск 2. С. 22-28. doi:10.31114/2078-7707-2020-2-22-28  
 [5] Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.  
 [6] Берг А., Дин П. Светодиоды. М.: Мир, 1979. 686 с.  
 [7] Антошин А.А., Бумай Ю.А., Дударь Н.Л., Шахов В.В. Использование математического моделирования для повышения качества GaAs светоизлучающих р–п-структур // Качество-99: материалы Международ. науч.-практ. конф., Минск, 1999 г. С. 249 – 253.  
 [8] Зайцев Ю. В. Полупроводниковые стабилитроны. М.: Энергия, 1969. 41 с.  
 [9] Кремлев В.Я. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС. М.: Высшая школа, 1990. 144 с  
 [10] Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 152 с.  
 [11] Лагунович Н.Л. Компьютерная программа MOD-1D. Свидетельство о регистрации компьютерной программы 742 РБ, Зап. в Реестре зарегистрированных в Нац. центре интеллектуал. собственности комп. программ 10.03.15.  
 [12] Gummel H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. V. ED-11. № 10. P. 455-465.  
 [13] Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. Рига: Зинатне, 1986. 167 с.  
 [14] Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 532 с.  
 [15] Гетьман С.Н., Леонов Н.И., Лемешевская А.М., Лагунович Н.Л. Высоковольтный NМОП-транзистор со встроенным каналом в составе интегральной микросхемы IL3361 «высокостабильный LED драйвер»: св. на ТИМС № 135 Респ. Беларусь, опубли. 30.08.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. № 4. С. 320; св. о гос. рег. ТИМС № 2013630116 Рос. Федерации, опубли. 20.09.13 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуал. собственности. 2013. № 9.

## The Research of Electrophysical Behavior of Infrared GaAs-, GaP- and $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ -structures with P–N-Junction by Means of Simulation

N.L. Lagunovich

Open Join-Stock Company “INTEGRAL”–“INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, n\_dudarb@tut.by

**Abstract** — The aim of this work were designing one-dimensional models of structures with p–n-junction received

on basis of GaAs, GaP and  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  and the research of their electrophysical behavior and radiative characteristics

by means of simulation. One-dimensional models of diode structures under study were developed by the author to research their electrophysical behavior with help of simulation. The fundamental system of semiconductor equations is in the base of these models which are efficient in terms of machine time costs. These models are in the composition of program MOD-1D developed by the author and the device modeling investigated homogeneous diode structures was performed by means of this program. MOD-1D gives the possibility to calculate and construct dependences of such diode structures emission intensity on the coordinate and to receive the dependences of their radiation intensity maximum  $I_{max}$  on the voltage applied to the p-n-junction. Calculations were carried out for different impurity gradients in regions of n- and p-types and trends of radiation intensity maximum  $I_{max}$  position changes were defined for various injection levels and doping concentration values. It was determined that the radiation intensity maximum biases into the region with higher impurity concentration levels n-type from the p-n-junction boundary at low injection levels and the further shift almost stops and becomes insignificant at high injection levels. Devices obtained on basis of GaAs, GaP and  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  are not manufactured serially in production conditions of Open Joint-Stock Company "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company. Thereby, research of electrophysical behavior of above mentioned infrared GaAs-, GaP- и  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ -structures with p-n-junction was executed with help of modeling in this paper.

**Keywords** — p-n-junction, semiconductor light-emitting structure, device simulation, forward voltage drop, radiation intensity, injection level.

#### REFERENCES

- [1] Sze S. Physics of Semiconductor Devices. Part 1., New York: John Wiley & Sons, 2nd edition, 1981. 873 p. (Russ. ed.: Suris R.A. Fizika poluprovodnikovyyh priborov. Ch. 1., Moscow: Mir, 1984. 455 s.) (in Russian).
- [2] Muller R., Kamins Th. Device electronics for integrated circuits, New York: John Wiley & Sons, 1986. 554 p. (Russ. ed.: Mazel E.Z., Hodosh L.S. Elementy integralnyh shem. M.: Mir, 1989. 630 s.) (in Russian).
- [3] Lagunovich N.L. The Research of P-N+-Junction Electrophysical Behavior With Help of Simulation in Rectangular and Cylindrical Coordinate Systems // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2021. Issue 1. P. 33-38. doi:10.31114/2078-7707-2021-1-33-38 (in Russian).
- [4] Lagunovich N.L. High-Voltage Silicon Diode Simulation, the Dependences of Its Current Density from Temperature Construction // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 2. P. 22-28. doi:10.31114/2078-7707-2020-2-22-28 (in Russian).
- [5] Kogan L.M. Poluprovodnikovye svetoizluchayushchie diody (Semiconductor Light-Emitting Diodes). M.: Energoatomizdat, 1983. 208 s. (in Russian).
- [6] Bergh A.A., Dean P.J. Light-emitting diodes, Oxford: Clarendon Press, 1976. 591 p. (Russ. ed.: Yunovich A.E. Svetodiody. M.: Mir, 1979. 686 s.) (in Russian).
- [7] Antoshin A.A., Bumay Uy. A., Dudar N.L., Shahov V.V. Ispolzovanie matematicheskogo modelirovaniya dlya povysheniya kachestva GaAs svetoizluchayushchih p-n-struktur (The mathematical simulation usage for improvement of GaAs light-emitting p-n-structures quality) // Kachestvo-99: materialy Mejdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 1999. S. 249-253. (in Russian).
- [8] Zaytsev Yu.V. Poluprovodnikovye stabilitrony (Semiconductor stabilitrons). M.: Energiya, 1969. 41 s. (in Russian).
- [9] Kremlyov V.Ya. Fiziko-topologicheskoe modelirovanie struktur elementov BIS (Physical and topological modeling structures of LSI elements). M.: Vysshaya shkola, 1990, 144 s. (in Russian).
- [10] Abramov I.I. Lektsii po modelirovaniyu elementov integralnyh shem (Lectures on simulation of integrated circuits elements). Moscow-Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2005. 152 s. (In Russian).
- [11] Lagunovich N.L. Komp'yuternaya programma MOD-1D (The computer program MOD-1D). Svidetelstvo o registratsii komp'yuternoy programmy 742 RB. Zap. v Reestre zaregistrirrovannyh v Nats. tsentre intellektual. sobstvennosti komp. programm 10.03.15. (in Russian).
- [12] Gummel H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. V. ED-11, no10. P.455-465.
- [13] Polskiy B.S. Chislennoe modelirovanie poluprovodnikovih priborov (Numerical simulation of semiconductor devices). Riga: Zinatne, 1986. 167 s. (in Russian).
- [14] Samarskiy A.A., Nikolaev E.S. Metody resheniya setochnykh uravneniy (Methods of solving net equations). M.: Nauka, 1978. 532 s. (in Russian).
- [15] Getman S.N., Leonov N.I., Lemeshevskaya A.M., Lagunovich N.L. Vysokovoltniy NMOP-transistor so vstroennym kanalom v sostave integralnoy mikroshemy IL3361 «vysokostabilniy LED drayver» (The high-voltage NMOS-transistor with embedded channel in the composition of integrated circuit IL3361 "high-stable LED driver"). Sv. na TИMS № 135 Resp. Belarus, opubl. 30.08.13 // Afitsyyny byul. / Nats. tsentr intelektual. Ulasnastsi. 2013. № 4. S. 320; sv. o gos. reg. TИMS № 2013630116 Ros. Federatsii, opubl. 20.09.13 // Ofitsialnyy byul. / Federalnaya slujba po intellektual. sobstvennosti. 2013. № 9. (in Russian).