

## МОДЕЛИРОВАНИЕ P-I-ФОТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ AlGaN

*Н.Н. Ворсин, канд. физ.-мат. наук, доц., А.А. Гладыщук, канд. физ.-мат. наук, доц., Т.Л. Кушнер, канд. физ.-мат. наук, доц., Н.П. Тарасюк, ст. преподаватель, С.В. Чугунов, ст. преподаватель*

*Брестский государственный технический университет,  
Брест, Беларусь*

*Тройные соединения AlGaN с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ являются перспективными материалами для фотоприемных устройств в ультрафиолетовом диапазоне. С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics на основе  $Al_xGa_{1-x}N$  разработана модель p-i-n фотодиода, включая его ВАХ, спектральную чувствительность принимаемого излучения и коэффициента поглощения как функции доли алюминия и толщины обедненного слоя. Пиковая чувствительность фотодиода составляет от 0,08 до 0,18 А/Вт в диапазоне длин волн от 0,20 до 0,33 мкм.*

**Ключевые слова:** *соединение AlGaN, p-i-n-фотодиод, спектральная чувствительность.*

Нитридные соединения, состоящее из InN, GaN, AlN, и их сплавы, являются материалами, которые обладают высокой подвижностью электронов, высоким значением скорости насыщения носителей, хорошей термостойкостью и проводимостью, варьируемой по ширине запрещенной зоной, высоким коэффициентом оптического поглощения. Значение последнего для рассматриваемых соединений превышает  $10^4 \text{ см}^{-1}$  [1].

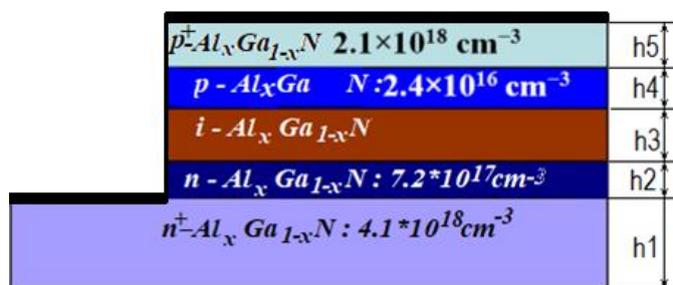
Ширина запрещенной зоны материала  $Al_xGa_{1-x}N$  может изменяться в диапазоне от 3,4 эВ до 6,2 эВ, в зависимости от содержания алюминия в составе соединения [2, 3]. Значительная доля падающего света проникает в глубину на несколько сотен нанометров поглощающей области. Благодаря этим физическим свойствам, нитридные полупроводники являются перспективными материалами для многочисленных оптоэлектронных устройств, таких как как светодиоды, лазерные диоды, солнечные элементы и фотодиоды.

В данной работе предпринята попытка моделирования p-i-n-фотодиодов на основе тройного соединения AlGaN с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics. На основе построенной модели получены зависимости основных характеристик фотодиодов от таких параметров, как мольная доля алюминия и толщина слоя с собственной проводимостью (i-слоя). Полученная из моделей информация была использована для разработки фотодетектора ультрафиолетового излучения с максимумом спектральной чувствительности к излучению с длиной волны 0,24 мкм.

Исследуемая структура является типичной для нитридных фотодиодов и показана на рисунке 1. Между n- и p-слоями с умеренной электронной и дырочной проводимостью, помещается i-слой с собственной проводимостью, в котором происходит основное

поглощение падающего света и появление свободных носителей заряда. Данная трех-слойная структура дополняется сверху и снизу слоями с высокой степенью легирования  $n^+$  и  $p^+$ , которые позволяют получить омические контакты с металлическими выводами, которые изображены на рисунке 1 утолщенными черными линиями. Нижний  $n^+$ -слой, помимо контактирования с выводами, решает еще несколько задач. Он уменьшает прорастание дислокаций от контакта с подложкой в вышележащие слои и компенсирует погрешности глубины травления верхних слоев при разделении диодов. Поэтому толщина нижнего  $n^+$ -слоя существенно превосходит толщину других слоев. Он наносится на буферный слой AlN, который, в свою очередь, опирается на сапфировую подложку. Омический контакт реализуется сверху выступающей части  $n^+$ -области. Толщины слоев, обозначенные как  $h_1$ – $h_5$ , являются параметрами, которые могут оперативно изменяться перед запуском расчета модели.

Рисунок 1. – Структура фотодиода на основе AlGaN



Модуль «Оптоэлектроника» пакета моделирования COMSOL Multiphysics решает ряд основных уравнений, состоящих из уравнения Пуассона, уравнения неразрывности и уравнений переноса для электронов и дырок. Кроме того, он предлагает несколько современных физических моделей взаимодействия полупроводника с электромагнитным излучением. Существуют температурно-зависимые модели подвижности носителей в нитридных материалах в слабом и сильном полях. Однако, поскольку расчет проводился только для комнатной температуры, температурная зависимость была исключена из формул. Это позволило использовать для подвижности электронов более простые выражения.

В рамках данной публикации не представляется возможным привести все теоретические предпосылки и математические уравнения, используемые в процессе моделирования. Более полная информация изложена в ранее опубликованных работах [4, 5].

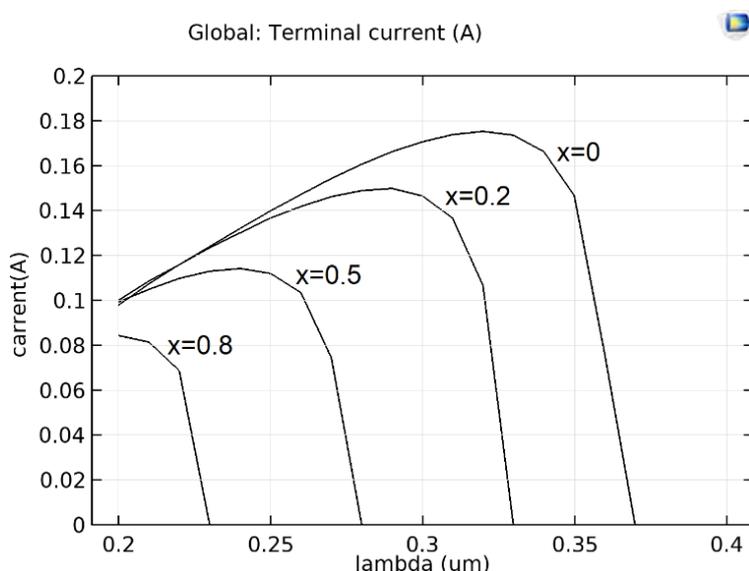
Ввиду большой ширины запрещенной зоны AlGaN основным механизмом потери носителей в AlGaN является рекомбинация, обусловленная дефектами. В расчетах учитываются две модели рекомбинации. Упрощенная модель рекомбинации на дефектах (ловушках) Шокли-Рида-Холла, в которой ловушкам приписывается один энергетический уровень, а другие характеристики, включая концентрацию дефектов, выражаются временами жизни электронов и дырок. Данное время взято равным  $\tau = 1$  нс, а энергетический уровень дефектов взят вблизи середины запрещенной зоны. Второй учитываемый тип – прямая рекомбинация с параметром  $C = 10^{-8} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  [5].

COMSOL Multiphysics предлагает несколько моделей оптической генерации и рекомбинации носителей. Была использована модель, основанная на расчете элемента

переходной матрицы через время жизни носителя при спонтанной рекомбинации, которое взято равным  $\tau_{\text{спонт}} = 1$  нс. Элемент переходной матрицы, также очень сильно зависит от показателя преломления материала. Величина последнего, в свою очередь, является функцией длины волны  $\lambda$ .

Главными параметрами фотоприемника являются: коэффициент преобразования мощности падающей электромагнитной волны в электрический ток – так называемая ватт-амперная характеристика и зависимость этого коэффициента от длины световой волны – спектральная характеристика.

На рисунке 2 приведены полученные в результате расчетов графики зависимости величины фототока от длины световой волны при различных мольных долях  $x$  алюминия в составе  $i$ -слоя. Расчеты проводились для толщины  $i$ -слоя  $h_3 = 0,2$  мкм и приложенного к фотодиоду обратного напряжения  $V_n = 1$  В. Мощность падающего излучения принималась равной  $P = 1$  Вт.

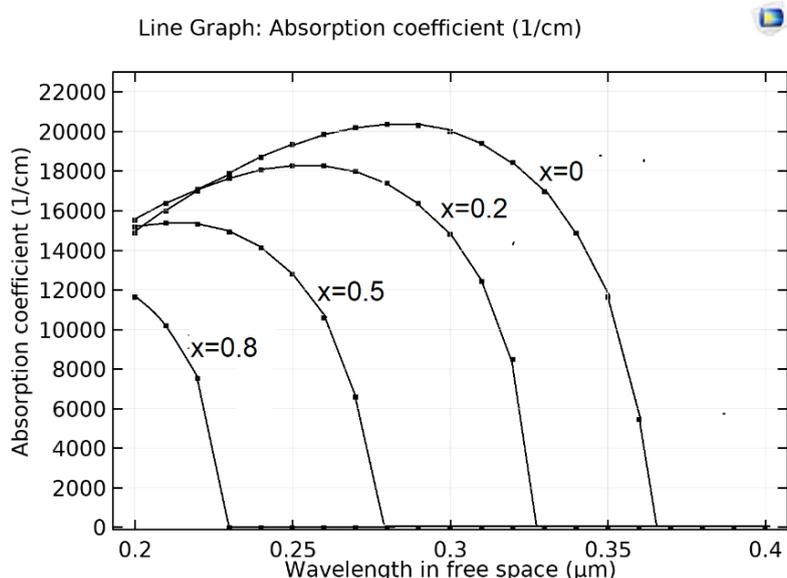


**Рисунок 2. – Зависимости величины фототока от длины волны падающего излучения ( $x$  – мольная доля алюминия в составе  $i$ -слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ )**

Максимум спектральной характеристики, в зависимости от  $x$ , приходится на длины волн от 0,2 мкм до 0,34 мкм. При этом в коротковолновой части диапазона, для  $x = 0,8$  максимум спектральной характеристики составляет  $k=0,085$  А/Вт, в длинноволновой части для  $x=0$  соответственно  $k=0,175$  А/Вт.

Спад спектральной характеристики при уменьшении длины световой волны вполне очевиден и обусловлен уменьшением плотности фотонного потока при неизменной величине мощности падающего излучения и увеличивающейся энергии фотонов. Кроме того, использованная модель частотной зависимости коэффициента преломления Зельмейера (в альтернативном прочтении – уравнение Селмейера) определяет возрастание последнего с убыванием длины световой волны. Увеличение показателя преломления приводит к уменьшению элемента переходной матрицы в модели поглощения света и соответствующему уменьшению поглощения фотонов.

На рисунке 3 приведены графики дисперсии коэффициента поглощения  $\alpha$  для соединения  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  при различных величинах доли алюминия  $x$ . Отметим, что приводимые в литературе значения коэффициента  $\alpha$  для соединения  $\text{AlGaIn}$  в области поглощения им световой мощности, существенно отличаются. Его величина по одним источникам составляет более  $10^5 \text{ см}^{-1}$  [6], а по другим – около  $1,8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$  [7]. Полученные нами при моделировании величины  $\alpha$  скорее подтверждают последние значения. Однако не очевидно, что примененная модель взаимодействия полупроводника с излучением учитывает все механизмы этого процесса. Пересечение функций в области длины волны 0,23 мкм, вероятно, объясняется дисперсией коэффициента преломления материала, который сильнее влияет на величину элемента переходной матрицы при  $x < 0,5$ , чем при  $x$  большем или равном 0,5.



**Рисунок 3. – Дисперсия коэффициента поглощения для соединения  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  при различных величинах доли алюминия  $x$ .**

Одним из важных вопросов построения p-i-n фотодиодов является выбор толщины поглощающего i-слоя. Согласно полученным нами данным при моделировании основной прирост фототока приходится на интервал толщин от 200 до 800 нм, следовательно, является наилучшим для реализации наибольшего коэффициента преобразования. Тем не менее, максимум чувствительности по толщине i-слоя не был обнаружен.

Результаты моделирования, представленные в данной работе, могут быть использованы для оптимизации фотоприемников на основе соединения  $\text{AlGaIn}$  и разработки нового поколения оптоэлектронных устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заяц, Н. С. Оптические свойства пленок  $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , легированных кремнием. / Н. С. Заяц [и др.] // Физика и техника полупроводников, 2009. – Том 43, вып. 5. – С. 617–620.
2. Mohammad, S. N. Progress and prospects of group-III nitride semiconductors / S. N. Mohammad, H. Morokos // Progress in Quantum Electronics. 1996. – Vol. 20, № 5–6. –P. 361–526.

3. Ambacher, O. Growth and applications of Group III-nitrides / O. Ambacher // Journal of Physics D: Appl. Phys. – 1998 – Vol. 31, № 20. – P. 2653–2710.
4. Ворсин, Н. Н. Моделирование и разработка AlGaN p-i-n фотодиодов / Н. Н. Ворсин, А. А. Гладыщук, Т. Л. Кушнер [и др.] // Вестник Брестского государственного университета. – 2020. – № 5 (107): Физика, математика, информатика. – С. 5–14.
5. Vorsin, N. Modeling AlGaN p-i-n photodiodes / N. Vorsin, A. Gladyshchuk, T. Kushner [et al.] // Доклады БГУИР. – Т. 19, № 8. – 2021. – С. 50–57.
6. Hirsch, L. Electrical characterization of InGaN/GaN light emitting diodes grown by molecular beam epitaxy / L. Hirsch, A. S. Barriere // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 94, № 8. – P. 5014–5020.
7. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис ; пер. с англ. под ред. д.ф.-м.н. Б. Т. Коломийца. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Мир, 1982. – 663 с.