

Рисунок 3 – Примеры сигналов, получаемых от энцефалографов Emotiv

Как можно заметить, что, хотя доступные энцефалографы потребительского сегмента количественно различаются по своим функциональным возможностям, тем не менее даже простейшие из рассмотренных устройств позволяют получать данные мониторинга, свидетельствующие о состоянии пользователя в процессе его работы. В случае более простых энцефалографов наиболее перспективной является метрика, отражающая степень сосредоточенности пользователя на решаемой задаче. В случае более сложных устройств добавляется возможность вычислять параметры активности на основе разницы сигналов, поступающих из различных участков мозга, а также доступны к непосредственному использованию предварительно вычисленные характеристики, отражающие эмоциональное состояние пользователя.

Список цитированных источников

1. Гусельников, В. И. Электрофизиология головного мозга. – М: Высш. шк, 1976.
2. Ramirez, R. Detecting emotion from EEG signals using the Emotive EPOC device / R. Ramirez, Z. Vamvakousis // Brain Informatics, LNCS. – 2012. – V. 7670. – P. 175-184.
3. Sezer, A. An Investigation of University Students' Attention Levels in Real Classroom Settings with NeuroSky's MindWave Mobile (EEG) Device. / A. Sezer, Y. Inel, A.Ç. Seçkin, U. Uluçinar // Proc. of IETC 2015 int. conf., May 27-29. – Istanbul, Turkey. - P. 88-101.

УДК: 621.383.52

Чугунов А. С.

Научный руководитель: ст. преподаватель Чугунов С. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ P-I-N ФОТОДИОДОВ

III-нитридное соединение материалов, состоящее из InN, GaN, AlN, и их сплавы, являются полупроводниками, обладающими такими физическими свойствами как: высокая подвижность электронов; высокое значение скорости насыщения носителей; хорошая термостойкость и проводимость; прямая и перестраиваемая по ширине запрещенная зона с высоким коэффициентом оптического поглощения.

Коэффициент поглощения III-нитридных материалов составляет более 10^4 см^{-1} [1]. Значительная доля падающего света проникает в глубину на несколько сотен нанометров поглощающей области. Ширина запрещенной зоны E_g материала $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (AlGaN) варьируется в диапазоне от 3,4 эВ до 6,2 эВ, в зависимости от пропорции x алюминия в составе соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [2,3].

Благодаря этим физическим свойствам, III-нитридные полупроводники являются перспективными материалами для многочисленных оптоэлектронных устройств, таких как светодиоды, лазерные диоды, солнечные элементы и фотодиоды.

В данной работе представлено моделирование р-і-п-фотодиодов на основе тройного соединения AlGaN с помощью программного средства Comsol-Multiphysics.

Исследуемая структура является типичной для нитридных фотодиодов и показана на рисунке 1. Между слоями “n” и “p”, с умеренной электронной и дырочной проводимостью, помещается і-слой с собственной проводимостью, в котором происходит основное поглощение принимаемого света и преобразование его в свободные носители заряда. Данная трехслойная структура дополняется сверху и снизу слоями с высокой степенью легирования “n+” и “p+”, которые позволяют получить омические контакты с металлическими выводами, изображенными на рисунке 1, утолщенными черными линиями.

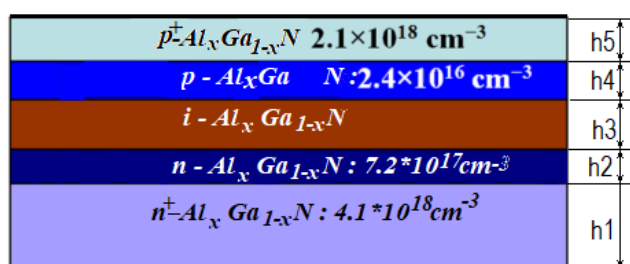


Рисунок 1 – Структура исследуемого р-і-п фотодиода

Толщины слоев, обозначенные как h1 – h5, являются параметрами, которые могут оперативно изменяться перед запуском модели на расчет. На практике контактная n+ область делается шире остальной структуры и омический контакт реализуется сверху выступающей части. Однако такая геометрия, будучи заложенной в расчет, неоправданно усложняет его, без заметного изменения результатов.

Модуль «оптоэлектроника» программного продукта Comsol-Multiphysics решает ряд основных полупроводниковых 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.

Comsol предлагает несколько моделей оптической генерации и рекомбинации носителей. В работе была использована модель, основанная на расчете элемента переходной матрицы через время жизни носителя при спонтанной рекомбинации, которое взято равным $\tau_{\text{spont}} = 1$ нс. Элемент переходной матрицы, также очень сильно зависит от показателя преломления материала – n. Величина последнего, в свою очередь, является функцией длины волны λ . Эту зависимость можно приближенно описать дисперсионным уравнением Селмейера [2]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A_0}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}, \quad (1)$$

где A_0 и λ_0 – константы, которые определяются шириной запрещенной зоны E_g и для нитридных соединений аппроксимируются следующими выражениями [1]:

$$A_0 = 6,626 - 0,934E_g + 0,0598E_g^2, \quad (2)$$

$$\lambda_0 = 396,8 - 84,12E_g + 6,758E_g^2$$

Comsol рассчитывает множество величин, в том числе, величину коэффициента поглощения и его спектральное поведение – $\alpha(\lambda)$, которое легко пересчитывается в коэффициент экстинкции:

$$k \lambda = \frac{\alpha(\lambda)\lambda}{4\pi}. \quad (3)$$

Численное моделирование проводилось для AlGaIn p-i-n фотодиода при температуре 293 К. Ширина диода полагалась равной 20 мкм, толщина – размер в глубину -1 м. Выбор толщины обусловлен особенностью задания абсолютной величины электромагнитной мощности, которая в двумерной задаче считается распределенной в глубину на единицу длины, т. е. на 1 м.

Ввиду большой ширины запрещенной зоны AlGaIn основным механизмом потери носителей в AlGaIn 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 1 нс, а энергетический уровень дефектов взят вблизи середины запрещенной зоны. Второй учитываемый тип – прямая рекомбинация с параметром $C=10^{-8}\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$.

Comsol вычисляет большое количество характеристик моделируемых процессов и имеет очень разнообразный арсенал представления результатов.

На основе построенной модели получены зависимости основных характеристик диодов от таких параметров, как мольная доля алюминия (x) и толщина слоя с собственной проводимостью (i -слоя). Так, на рисунке 2 представлен график зависимости величины фототока от длины световой волны с различной мольной доли алюминия в составе i -слоя (x). Мощность падающего светового потока составляла 1 Вт. Расчеты проводились для толщины i -слоя 0,2 мкм и обратном напряжении, приложенном к фотодиоду $V_n=1$ В. Максимум спектральной характеристики, в зависимости от x , приходится на длины волн от $\lambda=0,2$ мк до 0,32 мкм. При этом в коротковолновой части диапазона, для $x=0,8$ максимум ватт-амперной характеристики составляет $k=0,085$ А/Вт, в длинноволновой части – для $x=0$ – $k=0,175$ А/Вт.

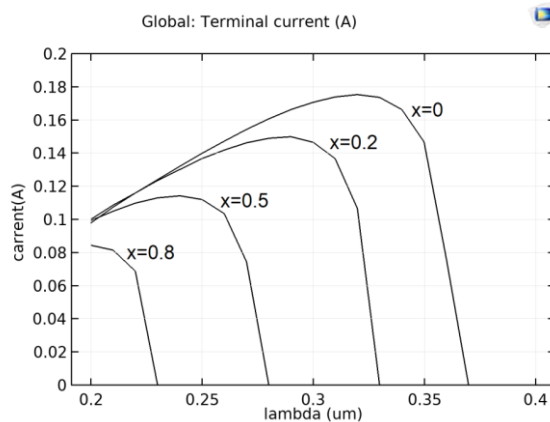


Рисунок 2 – Графики зависимости величины фототока (*carrent*) от длины световой волны (*lambda*) и мольной доли алюминия в составе *i*-слоя (*x*) при падающей световой мощности 1 Вт

Спад спектральной характеристики при уменьшении длины световой волны вполне очевиден и обусловлен уменьшением плотности фотонного потока при неизменной величине падающей световой мощности и увеличивающейся энергии фотонов. Кроме того, использованная модель частотной зависимости коэффициента преломления Селмейера определяет увеличение последнего с уменьшением длины световой волны. Увеличение показателя преломления приводит к уменьшению элемента переходной матрицы в модели поглощения света и соответствующему уменьшению поглощения света.

На рисунке 3 приведены графики дисперсии коэффициента поглощения AlGaN при различной величине доли алюминия. Стоит отметить, что до настоящего времени нет общепризнанных значений этой величины для AlGaN в области поглощения им световой мощности. Его величина - α по одним источникам [4] составляет более 10^5 см^{-1} , а по другим [5] – около $1,8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. Полученные при моделировании величины α скорее подтверждают последние значения. Однако не очевидно, что примененная модель взаимодействия полупроводника с излучением учитывает все механизмы этого процесса. Пересечение графиков при длине волны 0,23 мкм объясняется дисперсией коэффициента преломления материала, который влияет на величину элемента переходной матрицы при меньших x сильнее, чем при больших.

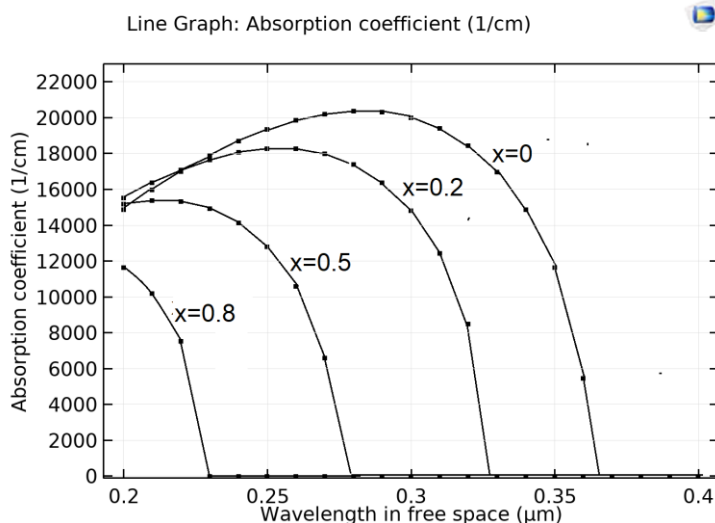


Рисунок 3 – Графики дисперсии коэффициента поглощения (*absorption coefficient*) AlGaN от длины световой волны (*wavelength in free space*) при различной величине доли алюминия *x*

Также с помощью симулятора Comsol-Multiphysics диод был изучен в отношении вольт-амперных характеристик и темнового тока.

Тройные сплавы AlGaN с шириной запрещенной зоны от 3,4 до 6,2 эВ весьма перспективны для фотоприемных устройств УФ диапазона длин волн. Используя программное обеспечение Comsol на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{N}$, разработана модель p-i-n фотодиода, включая его ВАХ, спектральную чувствительность принимаемого излучения, как функции доли алюминия и толщины обедненного слоя. Пиковая чувствительность фотодиода составляет от 0,08 до 0,18 А/Вт

при длинах волн 0,2 - 0,33 мкм. Это соответствует экспериментальным результатам, взятым из литературы.

Результаты моделирования, представленные в этой работе, могут быть использованы для оптимизации фотоприемников AlGaIn/GaN и разработки оптоэлектронных устройств нового поколения.

Список цитированных источников

1. Заяц, Н.С. Оптические свойства пленок GaN/Al₂O₃, легированных кремнием / Н.С. Заяц, П.А. Генцарь, В.Г. Бойко, О.С. Литвин // 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, Y.H. Morkos // Prog. Quant. Electr. – 1996. – Vol. 20. – P. 361-525.
3. Ambacher, O. Growth and applications of Group III-nitrides / O. Ambacher // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1998. – Vol. 31. – P. 2653.
4. Hirsch, L. Electrical characterization of InGaIn/GaN light emitting diodes grown by molecular beam epitaxy / L. Hirsch, A. S. Barriere // Journal of Applied Physics, 2003. – Vol. 94., No. 8. – P. 5014.
5. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н Мотт, Э.Дэвис. – Изд. 2-е. – М.: Мир, 1982. – 368 с.

УДК 551.492

Шульган А. А.

Научные руководители: к.т.н., доцент Костюк Д. А., ассистент Маркина А. А.

СПЕЦИФИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Введение

До недавнего времени оценку эффективности человеко-машинного взаимодействия с использованием приборных биометрических измерений, позволяющих выполнять мониторинг физического и эмоционального состояния пользователя при работе с программным обеспечением, ограничивали малая распространенность и высокая стоимость оборудования. Однако в последнее время на рынке появилось значительное число устройств с биометрическими датчиками, предназначенных для индустрии фитнеса и развлечений. К этой категории относятся в первую очередь оптические датчики измерения пульса, разработанные для спортивных пульсометров, а затем распространившиеся сначала на фитнес-трекеры, а после – на взаимодействующие со смартфоном т. н. «умные часы». Кроме того, существует ряд игровых устройств, регистрирующих мозговую активность (например, для тренировки концентрации внимания пользователя). Эти устройства достаточно точны, пригодны к непрерывному мониторингу, способны передавать данные на персональный компьютер и при этом, благодаря массовому производству, широко доступны на рынке [1].

Среди параметров организма, измеряемых устройствами потребительского сегмента, можно выделить сердечный ритм (частота сердечных сокращений, ЧСС), ритмы электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и электрическую проводимость кожи (ЭПК) [2]. Рассмотрим кратко каждый из них.

ЧСС – величина, отражающая число колебаний стенок артерии за единицу времени. При физической нагрузке, изменении эмоционального состояния