

Моделирование смены резистивных состояний в светодиодных структурах на основе InGaN/GaN

В.А. Рибенек,^{*} Л.Н. Вострецова[†]
Ульяновский государственный университет
Россия, 432017, г. Ульяновск,
ул. Л. Толстого, д. 42

(Поступила в редакцию 29.05.2023; подписана в печать 22.08.2023)

В данной работе исследуется изменение электрических характеристик светодиодных структур на основе InGaN/GaN, вызванное протеканием тока большой величины в импульсном режиме. Обнаружено устойчивое переключение между высокопроводящим (резистивным) и низкопроводящим (диодным) состояниями, сопровождающееся сменой механизма токопереноса. В качестве основного механизма переключения рассматривается перемещение подвижных дефектов и образование проводящих нитей (каналов) в области пространственного заряда.

PACS: 72.80.Ey

УДК: 538.935

Ключевые слова: светодиод, квантовая яма, токоперенос, эффект проводящей нити.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые структуры на основе гетероструктур InGaN/GaN обладают широким диапазоном рабочих температур, служат основой для устройств высокотемпературной оптоэлектроники, обладают высокой яркостью и всепогодным исполнением, применяются в устройствах оптической связи и охранных системах. Преимуществом таких светодиодных (СД) структур является малое потребление энергии, малое тепловыделение, вибростойкость, высокая термо- и временная стабильность. Однако процессы дефектообразования, приводящие к падению коэффициента полезного действия за счет туннельно-рекомбинационных процессов с участием дефектов, продолжают оставаться важной проблемой для данного типа СД.

С одной стороны, дефекты в СД структурах на основе InGaN/GaN рассматриваются как одна из основных причин падения коэффициента полезного действия в области больших токов. Падение эффективности связано с безызлучательной рекомбинацией в барьерной области из-за увеличения туннельной составляющей тока из квантовой ямы (КЯ) [1–6].

С другой стороны, дефекты в СД структурах на основе InGaN/GaN используются для получения новых свойств или улучшения параметров. Рядом исследователей уже были предложены конфигурации устройств, объединяющие в себе ReRAM на базе «металл-изолятор-металл» и СД [7–10], а также запоминающее устройство на базе диода с множественными КЯ [11, 12]. В предложенных устройствах эффект переключения достигался введением в структуру дополнительных дефектных слоев. Принцип работы данных устройств связан с подвижными дефектами, образующимися под действием напряжения проводящие нити

(каналы), способные быстро изменить сопротивление прибора [13, 14]. В [8] предложен способ получения квантовых точек со значительно более высокой концентрацией индия, основанный на использовании уже существующих дефектов в СД на основе InGaN (V-образных ямок, которые образуются из-за естественных дислокаций в материале).

В данной работе исследуется явление переключения из резистивного состояния в диодное (светоизлучающее) состояние СД на основе InGaN/GaN, обусловленное образованием подвижных дефектов при протекании импульса прямого тока большой величины.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались СД Taiwan Oasis Technology Co., Ltd синего свечения ($\hbar\omega_{\max} = 2.66$ эВ, $\lambda_{\max} = 468$ нм при комнатной температуре) на основе гетероперехода InGaN/GaN. Структура светодиода была выращена методом газовой фазной эпитаксии из металлорганических соединений (MOCVD) на сапфировой подложке шириной 400 мкм и представляла собой последовательные слои: слой i-GaN, слой n-GaN, активная область структуры, содержащая 10 периодов квантовых ям InGaN/GaN с шириной ~ 3 нм и шириной барьеров GaN ~ 10 нм, слой p-GaN, полупрозрачный контакт из ITO, а также накладные контакты к p- и n-областям (рис. 1). Площадь полупроводниковой структуры составляет 8×10^{-4} см². Полупроводниковые чипы монтировались в корпус методом «flip-chip».

Структуры подвергались воздействию одиночного импульса тока амплитудой до 400 мА и длительностью до 250 мкс, который создавался генератором сигналов специальной формы АКИП 3418/2.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось на автоматизированном измерительном комплексе, который предусматривает измерение малых токов с помощью Picoammeter Keithley 6485 (до 10 мА) и измерение больших токов с помощью В7-78.

* ribl98@mail.ru

† kapiton04@yandex.ru

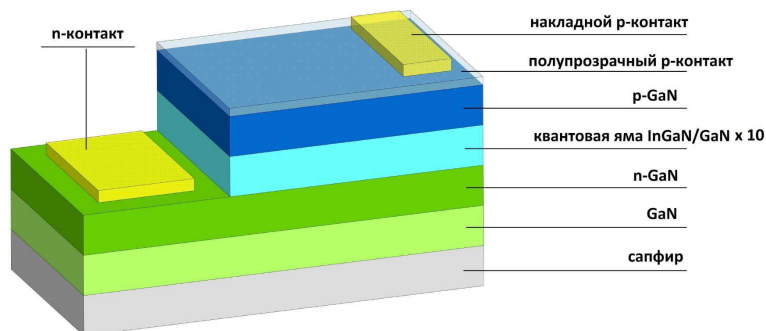


Рис. 1. Исследуемая структура на основе гетероперехода InGaN/GaN

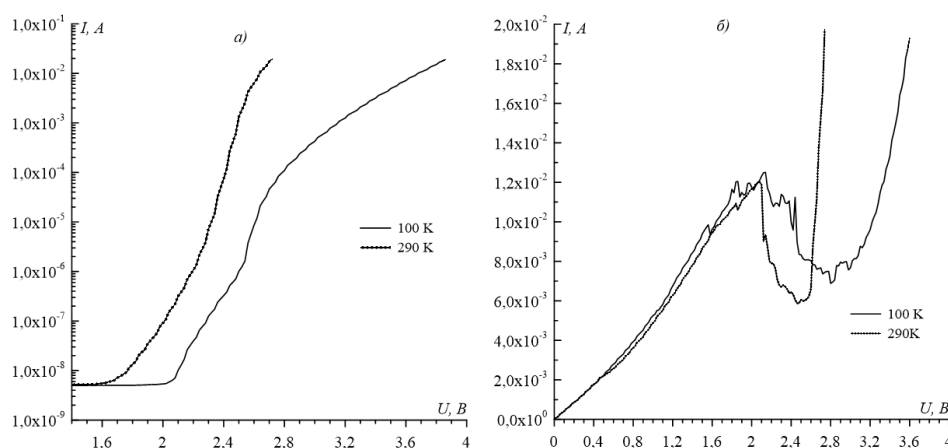


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики исследуемой структуры при температуре 100 К и 290 К до (а) и после (б) импульсного воздействия. Рис. 2, б приведен в линейном масштабе для иллюстрации наличия омического участка при напряжении до 2 В и экспоненциального участка при напряжении более 2 В на ВАХ

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 приведены прямые ВАХ до и после импульсного воздействия. Как видно из рис. 2, импульсное воздействие вызывает изменение хода ВАХ на участке напряжений до 2 В.

До импульсного воздействия на участке до 2 В наблюдается увеличение тока с ростом температуры, что характерно для полупроводниковых структур. Кроме этого, на ВАХ можно выделить участки с разными наклонами, что может свидетельствовать об участии нескольких глубоких уровней в формировании токопереноса [15].

После импульсного воздействия (рис. 2, б) происходит локальное изменение структуры гетероперехода за счет нагрева в результате протекания импульса тока, что приводит к появлению дополнительных подвижных дефектов [16]. При этом структура переходит в резистивное состояние, а на участке ВАХ до 2 В наблюдается линейный участок, который не зависит от температуры.

Кроме этого, ВАХ демонстрирует возможность переключения исследуемой структуры из резистивного состояния в области малых напряжений в диодное состояние при более высоких напряжениях, для которого характерно экспоненциальный рост тока с увеличением напряжения и увеличение тока с ростом температуры образца. В качестве возможного механизма, ответственного за резистивное переключение, было рассмотрено образование проводящих нитей в области пространственного заряда, появление которых связано с перемещением подвижных дефектов под действием приложенного напряжения [13, 14, 17, 18].

Дефекты в активной области структуры образуют проводящий канал (токопроводящую нить). Ток через диод протекает свободно, а поведение прибора можно охарактеризовать как резистивное. На ВАХ этот участок выглядит как прямая, которая описывается законом Ома. При прямом напряжении подвижные заряженные дефекты отталкиваются от границы *p-n*-перехода, «уходят» вглубь *p*- и *n*-областей полупроводника к электродам, что приводит к разрыву про-

дующей нити при напряжении смещения 2 В (рис. 3). На ВАХ наблюдается участок, соответствующий прямой ВАХ диода. При этом ток через диод уменьшается на порядок, а светоизлучающая способность восстанавливается из-за преобладания излучательной рекомбинации.

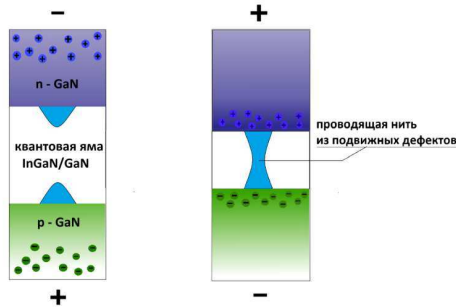


Рис. 3. Механизм смены резистивных состояний в СД структуре на основе InGaN/GaN

Следует отметить, что воспроизводимость касается хода ВАХ до и после переключения. На рис. 4 приведена статистика повторных переключений из резистивного состояния в диодное на прямой и обратной ВАХ при комнатной температуре.

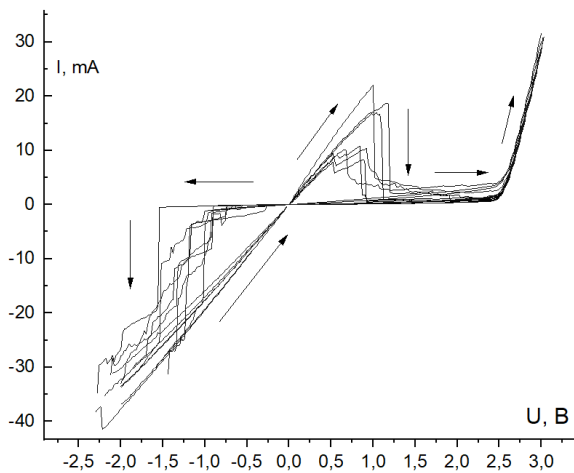


Рис. 4. Статистика переключений на вольт-амперных характеристиках исследуемой структуры

В значениях напряжения переключения присутствует разброс, как и в аналогичных работах авторов [13, 14]. Процесс образования нити рассматривается как случайный процесс, на данном этапе нельзя контролировать количество дефектов, упорядочиваемых электрическим полем, а, следовательно, образующих проводящий резистивный канал.

Также на рис. 4 наблюдается гистерезис ВАХ. Если после переключения резистивного состояния проводить измерения электрических характеристик на

уменьшение напряжения смещения, то структура остается в исходном состоянии (диодном для прямой ветви ВАХ и резистивном для обратной ветви ВАХ). Это может свидетельствовать о эффекте памяти в исследуемых структурах, аналогично [13, 14].

Описание процесса переключения (рис. 3) позволяет рассматривать ток в исследуемой структуре как

$$I = I_{can} + I_{sem} \text{ до переключения,} \quad (1)$$

$$I = I_{sem} \text{ после переключения,} \quad (2)$$

где I_{can} — ток через токопроводящую нить, образованную из подвижных дефектов, I_{sem} — диодный ток.

При прямом напряжении смещения подвижные дефекты отталкиваются от границы $p-n$ -перехода, можно предположить, что

$$I_{can} = A * U * N_1, \quad (3)$$

где A — постоянная пропорциональности, N_1 — количество дефектов, упорядоченных в нить. Пусть движение дефектов от границы $p-n$ -перехода связано только с дрейфовым механизмом (это доказывает переключение из резистивного состояния в диодное на прямой ВАХ и из диодного в резистивное на обратной ВАХ), тогда

$$\frac{1}{S} \frac{dN}{dt} = \mu N E = \mu N \frac{U}{L},$$

где S — площадь структуры, μ — подвижность дефектов в проводящей нити, E — напряженность электрического поля, L — длина активной области.

При проведении измерения использовалась линейная зависимость напряжения от времени $U = a * t$, тогда

$$\frac{1}{S} \frac{dN}{dt} = \mu N \frac{at}{L},$$

$$N = N_0 \exp\left(\mu S \frac{at^2}{2L}\right) = N_0 \exp\left(\mu S \frac{U^2}{2aL}\right).$$

Количество дефектов в канале

$$N_1 = N_0 - N = N_0 - N_0 \exp\left(\mu S \frac{U^2}{2aL}\right).$$

Тогда выражение (3) для тока по токопроводящей нити будет иметь вид

$$I_{can} = A * U * \left(N_0 - N_0 \exp\left(\mu S \frac{U^2}{2aL}\right)\right). \quad (4)$$

Для описания тока после переключения использовалось выражение (5) [15], учитывающее особенности токопереноса в структурах с квантовыми ямами

$$I_{sem} = I_0 \exp(\gamma U). \quad (5)$$

Результаты описания ВАХ исследуемой структуры по (1), (2), (4), (5) приведены на рис. 5.

Такой подход позволил оценить подвижность дефектов в канале — $2500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

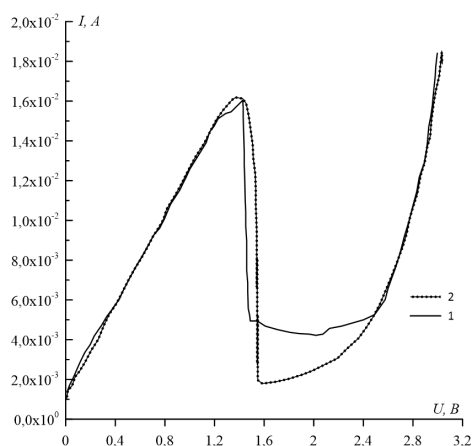


Рис. 5. Описание ВАХ: 1 — эксперимент; 2 — моделирование по формуле (1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследована возможность переключения резистивных состояний светодиодных структур InGaN/GaN модифицированных с помощью импульсного воздействия. В качестве возможного механизма, ответственного за резистивное переключение, было рассмотрено образование проводящих нитей в области пространственного заряда, образование которых связано с перемещением подвижных дефектов. Оценена подвижность дефектов, образующих токопроводящую нить при переключении резистивных состояний исследуемой структуры $2500 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

- [1] Бочкарева Н.И., Шретер Ю.Г. // Физика и техника полупроводников. **52**, вып. 7. 796. (2018).
- [2] Бочкарева Н.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. // Физика и техника полупроводников. **48**, вып. 8. 1107. (2014).
- [3] Pavesi M., Manfredi M., Rossi F. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **89**, 041 917 (2006).
- [4] Peter M. Laubsch, A., Bergbauer W. et al. // *Phys. Status Solidi A*. **206**, 1125 (2009).
- [5] Bockkareva N.I., Rebane Y.T., Shreter Y.G. // *Appl. Phys. Lett.* **103**, 191. 101 (2013).
- [6] Бочкарева Н.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. // Физика и техника полупроводников. **49**, вып. 12. 1714 (2015).
- [7] Zhang L., Zhu L., Li X. et al. // *Scientific Reports* **7**, Art. number: 45143, (2017).
- [8] Chang C.-W., Tan W.-C., Lu M.-L. et al. // *Scientific Reports* **4**, Art. number: 5121 (2014).
- [9] Liou Y.-R., Haider G., Cai S.-Y. Art. // *Advanced Optical Materials*. **4**, Iss. 11. 1744 (2016).
- [10] Ran Parka Y., KookChoib W., JoonHong Y. // *Current Applied Physics*. **19**, Iss. 2. 102 (2019).
- [11] Zheng K., Zhao J.L., Zhang Z.H. et al. // *IEEE Transactions on electron devices*. **63**, N 6 (2016).
- [12] Fu K., Fu H., Huang X. et al. // *IEEE Electron Device Letters*. **40**, Iss. 3 (2019).
- [13] Kumar D., Aluguri R., Chand U., Tseng T.Y. // *Ceramics International*. **43**, S547 (2017).
- [14] Zahoor F., Zainal T., Zulkifli A., Khanday F.A. // *Nanoscale Research Letters*. **15**, 90 (2020).
- [15] Булярский С.В., Рудь Ю.В., Вострецова Л.Н. и др. // Физика и техника полупроводников. **43**, вып. 4. 460 (2009).
- [16] Buckeridge J., Catlow C.R.A., Scanlon D.O. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016405 (2015).
- [17] Вострецова Л.Н., Рибенек В.А., Вострецов Д.Я. // Нано- и микросистемная техника. **25**. № 1. 23. (2023).
- [18] Вострецова Л.Н., Рибенек В.А., Вострецов Д.Я. // Прикладная физика. № 1. 49. (2023).

Modeling of change of resistive states in LED structures based on InGaN/GaN

V.A. Ribenek^a, L.N. Vostretsova^b

Ulyanovsk State University. Ulyanovsk, 432017, Russia E-mail: ^aribl98@mail.ru, ^bkapiton04@yandex.ru

In this work, we study the change in the electrical characteristics of LED structures based on InGaN/GaN, caused by the flow of a large current in a pulsed mode. Stable switching between high-conductivity (resistive) and low-conductivity (diode) states, accompanied by a change in the current transfer mechanism, is found. The movement of mobile defects and the formation of conducting filaments (channels) in the space charge region are considered as the main switching mechanism.

PACS: 72.80.Ey

Keywords: LED, quantum well, current transfer, conductive filament effect.

Received 29 May 2023.

Сведения об авторах

1. Рибенек Валерия Александровна — мл. науч. сотрудник; e-mail: ribl98@mail.ru.
2. Вострецова Любовь Николаевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: kapiton04@yandex.ru.