

УДК 538.935
EDN: FBDQOW

PACS: 72.80.Ey



Гистерезис электрических характеристик светоизлучающих структур на основе InGaN/GaN после импульсного воздействия

Л. Н. Вострецова, В. А. Рибенек, Д. Я. Вострецов

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.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-49-55

1. Введение

Исследование влияния дефектов светодиодов (СД) InGaN/GaN на электрические и оптические характеристики является актуальной задачей в связи с развитием программ по созданию твердотельного энергосберегающего освещения. С одной стороны установлено, что образующиеся в результате деградации дефекты приводят к падению коэффициента полезного действия структур на основе InGaN/GaN в области высоких токов. Так в [1, 2] показано, что высокая плотность глубо-

ких центров в GaN приводит к возникновению прыжковой проводимости через область пространственного заряда (ОПЗ). Падение эффективности связано с безызлучательной рекомбинацией в барьерной области из-за увеличения туннельной составляющей тока из квантовой ямы (КЯ). В работах [3–6] падение эффективности объясняют увеличением доли безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла в дефектных областях квантовой ямы.

С другой стороны, в настоящее время быстро развивается применение подвижных дефектов для создания переключающихся устройств, например, резистивной памяти с произвольным доступом (ReRAM). Принцип работы данных устройств [7, 8] связан с подвижными дефектами, образующими под действием напряжения проводящие нити (каналы), способные быстро изменить сопротивление прибора. Резистивная память делится на два основных типа: с биполярным и с униполярным переключением. В первом случае, для записи и стирания информации из ячейки требуется разная полярность напряжения [9, 10]. Во втором случае, и запись, и стирание производятся при одной и той же по-

Вострецова Любовь Николаевна¹, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: kapiton04@yandex.ru

¹ Ульяновский государственный университет.
Россия, 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42.

Рибенек Валерия Александровна¹, м.н.с.

E-mail: ribl98@mail.ru

Вострецов Дмитрий Ярославович², с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: dimka97@mail.ru

² НПК «Технологический центр».

Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1,
стр. 7, комн. 7237.

Статья поступила в редакцию 9.01.2023

После доработки 2.02.2023

Принята к публикации 20.02.2023

© Вострецова Л. Н., Рибенек В. А., Вострецов Д. Я., 2023

лярности и зависят лишь от уровня напряжения [11, 12].

Рядом исследователей уже были предложены конфигурации устройств, объединяющие в себе ReRAM на базе «металл-изолятор-металл» и СД [13–16], а также запоминающее устройство на базе диода с множественными КЯ [17, 18]. В предложенных устройствах эффект переключения достигался введением в структуру дополнительных дефектных слоев.

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

2. 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 твердого раствора InGaN.

Профиль распределения легирующей примеси в исследуемой структуре определялся из вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [19]. Измерение прямой и обратной ветви ВФХ проводилось в одном измерительном цикле с использованием измерителя емкости генераторного типа [20]. В такой установке исследуемый СД включается параллельно LC-контуре, параметры которого подобраны так, что при отсутствии исследуемого образца генерируемая частота составляет 1 МГц. Калибровка измерительной установки происходит перед каждым циклом измерения. Такая схема измерения позволяет добиться точности измерения емкости $\pm 0,5$ пФ. На рис. 1 приведен профиль распределения легирующей примеси в исследуемых СД, рассчитанный по [19].

Измерение прямых и обратных 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. Снятие ВАХ в области пере-

ключения проводилось при фиксированных пределах измерения вольтметра и амперметра для исключения влияния смены предела прибора на результаты измерения. На рис. 2 приведены прямые и обратные ВАХ исследуемых СД до импульсного воздействия.

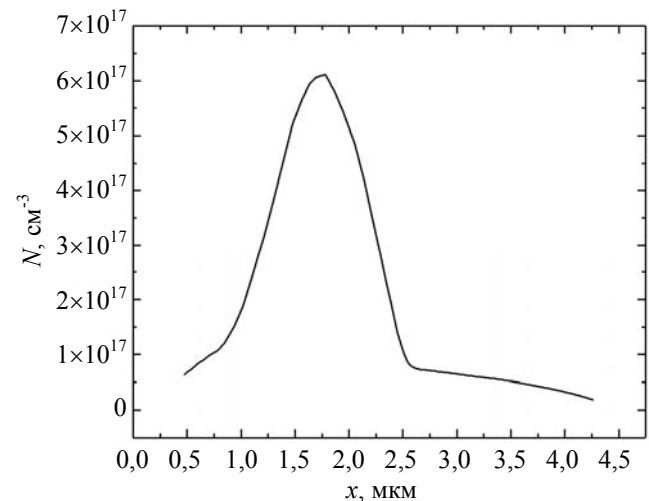


Рис. 1. Профиль распределения легирующей примеси в исследуемых СД

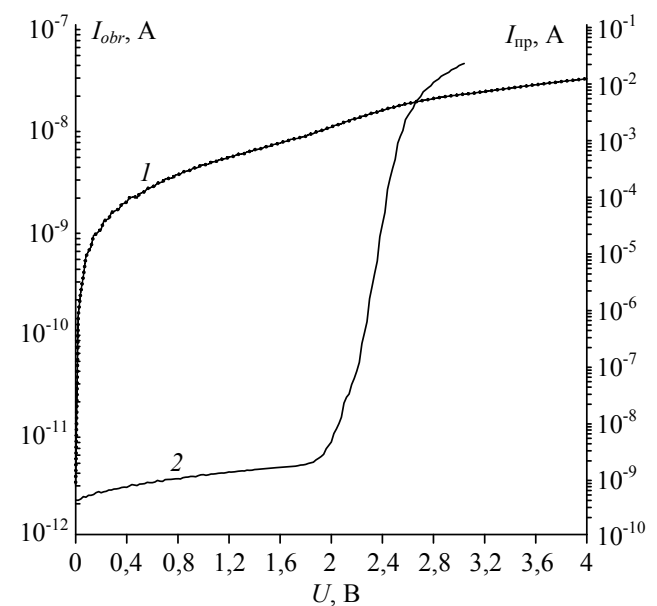


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики исследуемых структур: кривая 1 – обратная ВАХ; кривая 2 – прямая ВАХ

Из рис. 2 видно, что на прямой ветви ВАХ в области напряжений до 2 В наблюдается слабая зависимость тока от напряжения. Это свидетельствует о туннельном механизме токопереноса в данном диапазоне напряжений [21].

Обратные ВАХ обычно используют для диагностики уровней, участвующих в формировании токопереноса, в том числе и при туннельном механизме [22]. В [21] показано, что параметры рекомбинационных центров, участвующих в процессе токопереноса, можно определить по положению максимумов зависимости $d\beta/dU$ от напряжения, где β – дифференциальный показатель наклона ВАХ, в том числе и для структур с КЯ. На рис. 3 приведена зависимость $d\beta/dU$ от напряжения для исследуемых СД.

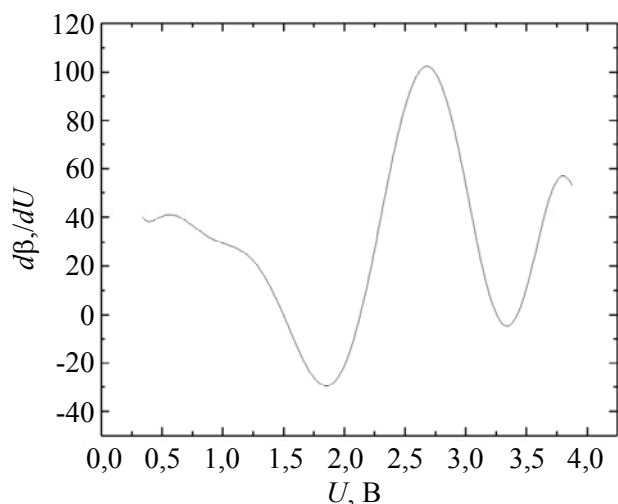


Рис. 3. Зависимость $d\beta/dU$ от напряжения для исследуемых СД

Из рис. 3 видно, что на зависимости $d\beta/dU$ от напряжения наблюдается максимум при напряжении 2,6 В, которому соответствует уровень с энергией 0,45 эВ. В используемой методике определения положения уровня [21] начало отсчета энергии зависит от природы уровня (донорный – отсчет от дна зоны проводимости, акцепторный – отсчет от потолка валентной зоны). Если предположить, что отсчет идет от потолка валентной зоны, то согласно [23] найденный уровень можно идентифицировать как глубокий уровень, созданный вакансией азота в состоянии + или 2+.

Исследуемые СД на основе InGaN/GaN подвергаются импульсному воздействию с помощью источника переменного напряжения Г5-63 (длительность импульса 40 мкс и амплитуда 15 В). Можно предположить, что при этом образуются дополнительные подвижные дефекты, за счет которых становятся возможными эффекты переключения в СД.

3. Результаты и обсуждение

Благодаря импульсному воздействию происходит изменение электрических характеристик исследуемых СД. На рис. 4 представлены прямые ВАХ после импульсного воздействия, снятые при возрастании напряжения на источнике питания в диапазоне 0–3 В (кривая 2) и при уменьшении напряжения на источнике питания в диапазоне 3–0 В (кривая 1). Как видно на рис. 4, при измерении на нарастание напряжения питания на ВАХ наблюдается резкий переход между резистивным участком (диапазон напряжений 0–2 В) и диодным участком при напряжении больше 2 В. При измерении ВАХ на убывание напряжения питания наблюдается ход ВАХ по диодной ветви, в том числе и в диапазоне напряжений 0–2 В (явление гистерезиса).

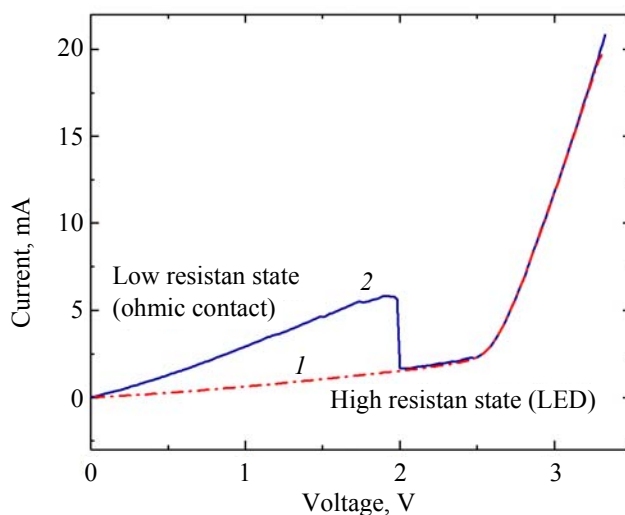


Рис. 4. Прямая ВАХ, снятая при убывании напряжения смещения (1) и возрастании напряжения смещения (2)

Можно предположить, что при импульсном воздействии на СД, увеличивается количество дефектов, в том числе подвижных. В частности, обнаруженная по зависимости $d\beta/dU$ от напряжения (рис. 3) вакансия азота при сообщении энергии может перейти состояние 3+, которое является уже подвижным дефектом (уровень находится в валентной зоне) [23]. При прямом смещении (в диапазоне напряжений 0–2 В) дефекты в р-п-переходе образуют проводящий канал (токопроводящую нить). Ток через диод протекает свободно, а поведение прибора можно охарак-

теризовать как резистивное. На ВАХ этот участок выглядит как прямая с наклоном $1,1 \pm 0,1 \text{ Ом}^{-1}$, следовательно, 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 проводящей нити при напряжении смещения 2 В. 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.

Для перевода СД в резистивное состояние необходимо провести измерение обратной ВАХ, на которой наблюдается переключение из высокоомного (диодного) состояния в низкоомное (резистивное) (рис. 5). Смена полярности приложенного напряжения меняет направление движения заряженных дефектов. Дефекты снова стягиваются в ОПЗ и образуют проводящий резистивный канал.

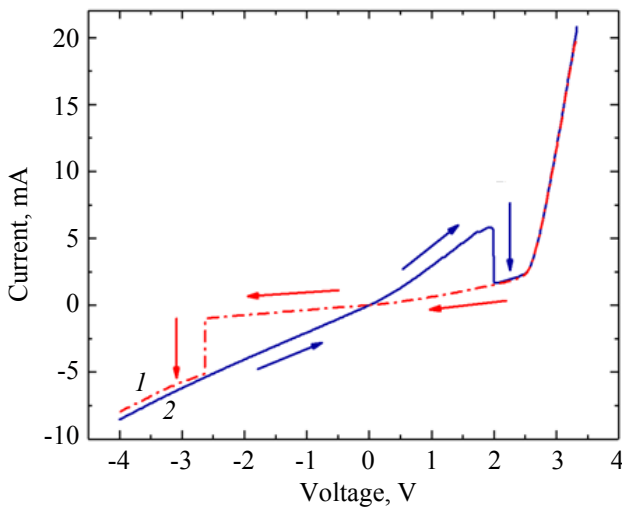


Рис. 5 Смена резистивных состояний исследуемой структуры на прямой и обратной ВАХ (кривая 1 изменена при убывании напряжения смещения, кривая 2 измерена при увеличении напряжения смещения)

На рис. 6 наблюдаются отрицательные значения, связанные с переходом структуры в резистивное состояние и, следовательно, с отсутствием ОПЗ (отрицательные значения емкости измерительный прибор демонстрировал при подключении керамических резисторов).

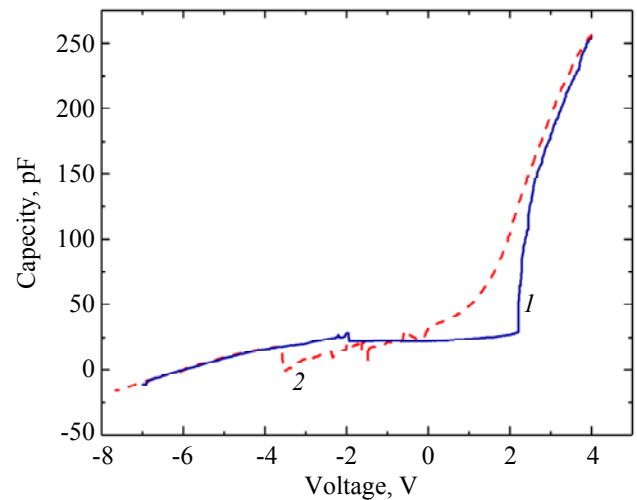


Рис. 6 ВФХ исследуемого СД (кривая 1 – измерение на нарастание прямого напряжения смещения, кривая 2 – измерение на нарастание обратного напряжения смещения).

Обнаружено, что изменение проводящего состояния исследуемых СД проявляется не только на ВАХ, но и на ВФХ (см. рис. 6). Кривая на рис. 6 иллюстрирует ход ВФХ при наличии переключения на прямой ВФХ. Измерения прямой и обратной ВФХ проводились в одном цикле от обратного смещения в прямое, при этом изначально исследуемый СД находился в резистивном состоянии. Кривая 2 иллюстрирует ВФХ, измеренную после переключения СД в диодное состояние в направлении от прямого смещения в обратное. Как видно из рис. 6, ВФХ также диагностируют смену состояния СД с резистивного на диодное (кривая 1). В резистивном состоянии (в диапазоне напряжений $-7 \div 2 \text{ В}$) наблюдается слабая зависимость емкости от напряжения, при переключении в диодное состояние (при напряжении более 2 В) на ВФХ наблюдается резкий рост значений емкости, что соответствует диодному поведению прямой ветви ВФХ. При измерении в обратном направлении исследуемая структура остается в диодном состоянии (кривая 2 рис. 6), ВФХ демонстрирует убывание с уменьшением напряжения прямого смещения и ростом напряжения обратного смещения, что полностью согласуется с теорией ВФХ диодных структур. При напряжении -3 В происходит переключение в резистивное состояние и ВФХ повторяет ход ветки, измеренной при росте напряжения прямого смещения.

4. Заключение

Таким образом, исследована возможность переключения резистивных состояний светодиодных структур InGaN/GaN модифицированных с помощью импульсного воздействия. На вольт-амперных и вольт-фарадных характеристиках исследуемого СД было обнаружено явление гистерезиса. В качестве возможного механизма, ответственного за обнаруженное резистивное переключение, было рассмотрено образование проводящих нитей, связанных с перемещением подвижных дефектов в область пространственного заряда.

Работа выполнена при поддержке

Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (проект FNRМ-2022-0008)

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарева Н. И., Шретер Ю. Г. / Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 7. С. 796–803.
2. Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г. / Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. Вып. 8. С. 1107–1116.
3. Pavesi M., Manfredi M., Rossi F., Meneghini M., Zanoni E., Zehnder U. / Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 041917.
4. Peter M., Laubsch A., Bergbauer W., Meyer T., Sabathil M., Baur J. / Phys. Status Solidi A. 2009. Vol. 206. P. 1125.
5. Bochkareva N. I., Rebane Y. T., Shreter Y. G. / Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. P. 191101.
6. Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г. / Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 12. С. 1714–1719.
7. Kumar D., Aluguri R., Chand U., Tseng T. Y. / Ceramics International. 2017. Vol. 43. P. S547–S556.
8. Zahoor F., Zainal T., Zulkifli A., Khanday F. A. / Nanoscale Research Letters. 2020. Vol. 15. P. 90.
9. Kim J., Jung K., Kim Y., Jo Y., Cho S., Woo H., Lee S. O., Inamdar A. I., Hong J., Lee J. K., Kim H. / Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 23930.
10. Kaswan J., Shukla A. K., Kumar A. / RSC Advances. 2017. Vol. 7. Is. 85. P. 54111–54116.
11. Chen Yi., Song H., Jiang H., Li Zh., Zhang Zh., Sun X., Lia D., Miao G. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 193502.
12. Nagase M., Takahashi T., Shimizu M. / Phys. Status Solidi A. 2021. Vol. 218. Is. 3. P. 2000495.
13. Zhang L., Zhu L., Li X., Xu Z., Wang W., Bai X. / Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 45143.
14. Chang C.-W., Tan W.-C., Lu M.-L., Pan T.-C., Yang Y.-J., Chen Y.-F. / Scientific Reports. 2014. Vol. 4. P. 5121.
15. Liou Y.-R., Haider G., Cai S.-Y., Wu C.-L., Chen Y.-F. / Advanced Optical Materials. 2016. Vol. 4. Is. 11. P. 1744–1749.
16. Young Ran Park, Won Kook Choib, Young Joon Hong / Current Applied Physics. 2019. Vol. 19. Is. 2. P. 102–107.
17. Zheng K., Zhao J. L., Zhang Z. H., Ji Y., Zhu B. B., Tan S. T., Demir H. V., Teo K. L., Sun X. W. / IEEE Transactions on electron devices. 2016. Vol. 63. Is. 6. P. 2328–2333.
18. Fu K., Fu H., Huang X., Yang T.-H., Chen H., Baranowski I., Montes J., Yang C., Zhou J., Zhao Y. / IEEE Electron Device Letters. 2019. Vol. 40. Is. 3. P. 1–1.
19. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. – М.: «Радио и связь», 1985.
20. Вострецов Д. Я., Вострецова Л. Н., Смирнова Т. С., Дмитриев Д. П. / Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21. № 4. С. 372–380.
21. Булярский С. В., Рудь Ю. В., Вострецова Л. Н., Кагарманов А. С., Трифонов О. А. / Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 4. С. 460–466.
22. Булярский С. В., Вострецова Л. Н., Гаврилов С. А. / Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. Вып. 1. С. 106–111.
23. Buckeridge J., Catlow C. R. A., Scanlon D. O., Keal T. W., Sherwood P., Miskuffova M., Walsh A., Woodley S. M., Sokol A. A. / Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114. P. 016405-1–016405-5.

Memory effect in InGaN/GaN-based LED structures

L. N. Vostretsova¹, V. A. Ribenek¹ and D. Y. Vostretsov²

¹Ulyanovsk State University
42 L. Tolstogo st., Ulyanovsk, 432017, Russia
E-mail: kapiton04@yandex.ru

²NPK "Technological Center"
Bd. 7, 1 Shokina square, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia

Received 9.01.2023; revised 2.02.2023; accepted 20.02.2023

Object of study. *The Taiwan Oasis Technology Co., Ltd blue glow CD ($\lambda_{max} = 468$ nm at room temperature) based on InGaN solid solution was studied. The purpose of the study. The problem of the influence of InGaN/GaN LED defects on electrical and optical characteristics has become most acute in connection with the development of programs for the creation of solid-state energy-saving lighting. An analysis of the literature has shown, on the one hand, the participation of defects in the rapid development of the degradation process, accompanied by a decrease in the efficiency of the structure, on the other hand, defects can lead to the observation of a switching phenomenon similar to modern RERAMS. Thus, studying the behavior of defects stimulated by pulsed current in InGaN/GaN-based LEDs is an urgent task. The purpose of this work is to study the effect of pulsed current on the electrical characteristics of InGaN/GaN-based LEDs. Methods and approaches used. The article discusses the reverse and forward volt-ampere characteristics of structures before and after the pulse action, measured switching on and off of the sample. The main results. A stable switching between high-conducting (resistive) and low-conducting (light-emitting) states was found, accompanied by a change in current transfer mechanisms. The movement of mobile defects and the formation of conductive filaments (channels) in the region of spatial charge is considered as the main switching mechanism.*

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-49-55

REFERENCES

1. Bochkareva N. I. and Schroeter Yu. G., Semiconductors **52** (7), 934–941 (2018) [in Russian].
2. Bochkareva N. I., Rebane Y. T. and Schroeter Y. G., Semiconductors **48** (8), 1079–1087 (2014) [in Russian].
3. Pavesi M., Manfredi M., Rossi F., Meneghini M., Zanoni E., Zehnder U. and Strauss U., Appl. Phys. Lett. **89**, 041917 (2006).
4. Peter M., Laubsch A., Bergbauer W., Meyer T., Sabathil M. and Baur J., Phys. Status Solidi A **206**, 1125 (2009).
5. Bochkareva N. I., Rebane Y. T. and Shreter Y. G., Appl. Phys. Lett. **103**, 191101 (2013).
6. Bochkareva N. I., Rebane Y. T. and Schroeter Y. G., Semiconductors **49** (12), 1665–1670 (2015) [in Russian].
7. Kumar D., Aluguri R., Chand U. and Tseng T. Y., Ceramics International **43**, S547–S556 (2017).
8. Zahoor F., Zainal T., Zulkifli A. and Khanday F. A., Nanoscale Research Letters **15**, 90 (2020).
9. Kim J., Jung K., Kim Y., Jo Y., Cho S., Woo H., Lee S. O., Inamdar A. I., Hong J., Lee J. K. and Kim H., Scientific Reports **6**, 23930 (2016).
10. Kaswan J., Shukla A. K. and Kumar A., RSC Advances **7** (85), 54111–54116 (2017).

11. Chen Yi., Song H., Jiang H., Li Zh., Zhang Zh., Sun X., Lia D. and Miao G., *Appl. Phys. Lett.* **105**, 193502 (2014).
12. Nagase M., Takahashi T. and Shimizu M., *Phys. Status Solidi A* **218** (3), 2000495 (2021).
13. Zhang L., Zhu L., Li X., Xu Z., Wang W. and Bai X., *Scientific Reports* **7**, 45143 (2017).
14. Chang C.-W., Tan W.-C., Lu M.-L., Pan T.-C., Yang Y.-J. and Chen Y.-F., *Scientific Reports* **4**, 5121 (2014).
15. Liou Y.-R., Haider G., Cai S.-Y., Wu C.-L. and Chen Y.-F., *Advanced Optical Materials* **4** (11), 1744–1749 (2016).
16. Young Ran Park, Won Kook Choib and Young Joon Hong, *Current Applied Physics* **19** (2), 102–107 (2019).
17. Zheng K., Zhao J. L., Zhang Z. H., Ji Y., Zhu B. B., Tan S. T., Demir H. V., Teo K. L. and Sun X. W., *IEEE Transactions on electron devices* **63** (6), 2328–2333 (2016).
18. Fu K., Fu H., Huang X., Yang T.-H., Chen H., Baranowski I., Montes J., Yang C., Zhou J. and Zhao Y., *IEEE Electron Device Letters* **40** (3), 1–1 (2019).
19. Batavin V. V., Kontsevoi Yu. A. and Fedorovich Yu. V., *Measurement of parameters of semiconductor materials and structures, Moscow, "Radio and communication", 1985* [in Russian].
20. Vostretsov D. Y., Vostretsova L. N., Smirnova T. S. and Dmitriev D. P., *Izvestiya of Saratov University. Physics* **21** (4), 372–380 (2021) [in Russian].
21. Bulyarsky S. V., Rud' Yu. V., Vostretsova L. N., Kagarmenov A. S. and Trifonov O. A., *Semiconductors* **43** (4), 460–466 (2009) [in Russian].
22. Bulyarsky S. V., Vostretsova L. N. and Gavrilov S. A., *Semiconductors* **50** (1), 106–111 (2016) [in Russian].
23. Buckeridge J., Catlow C. R. A., Scanlon D. O., Keal T. W., Sherwood P., Miskufova M., Walsh A., Woodley S. M. and Sokol A. A., *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016405-1–016405-5 (2015).