

## Особенности адмиттанса МДП структур на основе МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ( $x = 0,30$ )

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий,  
Н. Н. Михайлов, М. В. Якушев, Г. Ю. Сидоров

*В широком диапазоне условий измерения экспериментально исследован адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ  $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Si}(013)$  с приповерхностным варизонным слоем с повышенным содержанием  $\text{CdTe}$  и без такого слоя, причем при использовании в качестве диэлектрика  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Показано, что вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур на основе МЛЭ  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  без варизонного слоя при 77 К имеют высокочастотный вид относительно времени перезарядки быстрых поверхностных состояний. Это позволяет определять концентрацию дырок по значению емкости в минимуме низкочастотной ВФХ при 77 К (в отличие от случая  $x = 0,21\text{--}0,23$ ). Установлено, что для МДП-структуры на основе  $p\text{-HgCdTe}$  с варизонным слоем значения дифференциального сопротивления области пространственного заряда в режиме сильной инверсии в 10–100 раз больше, чем для МДП-структуры на основе  $p\text{-HgCdTe}$  без такого слоя.*

*Ключевые слова:*  $\text{HgCdTe}$ , молекулярно-лучевая эпитаксия, МДП-структура, варизонный слой, адмиттанс, вольт-фарадная характеристика.

### Введение

Узкозонный полупроводник  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $\text{HgCdTe}$ ) обладает уникальными фундаментальными свойствами, которые делают его незаменимым при создании высокочувствительных детекторов для различных областей инфракрасного диапазона [1, 2]. Ширина запрещенной зоны  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  зависит от содержания в твердом растворе  $\text{CdTe}$  (состава  $x$ ), что позволяет разрабатывать собственные детекторы, например, для спектральных областей окон прозрачности атмосферы (3–5 и 8–12 мкм).

Значительный прогресс при создании фотоприемных устройств на основе  $\text{HgCdTe}$  связан с развитием метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) этого материала. Создание приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием  $\text{CdTe}$  позволяет улучшить пороговые свойства детекторов за счет эффективного подавления влияния поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в объеме полупроводника [3]. Материал  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  при  $x = 0,30\text{--}0,32$  востребован при создании детекторов для спектральной области 3–5 мкм (MWIR).

Исследования МДП-структур на основе МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  обеспечивают полезную информацию о свойствах приповерхностного слоя полупроводника и границы раздела, а также необходимы для выбора оптимальных пассивирующих покрытий. Свойства МДП-структур на основе МЛЭ  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  в настоящее время изучены более подробно для состава  $x = 0,21\text{--}0,23$ , чем для  $x = 0,30\text{--}0,32$ . Электрофизические характеристики МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,31\text{--}0,32$ ) исследованы в широком диапазоне температур в работе [4].

Целью данной работы является экспериментальное выявление особенностей адмиттанса (полной комплексной проводимости) МДП-структур на основе МЛЭ  $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,30$ ) с различными диэлектрическими покрытиями ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и с различным распределением состава в приповерхностном слое полупроводника.

Войцеховский Александр Васильевич<sup>1</sup>, зав. кафедрой.

Несмелов Сергей Николаевич<sup>1</sup>, с.н.с.

Дзядух Станислав Михайлович<sup>1</sup>, с.н.с.

Варавин Василий Семенович<sup>2</sup>, с.н.с.

Дворецкий Сергей Алексеевич<sup>1,2</sup>, зав. отделом.

Михайлов Николай Николаевич<sup>2</sup>, с.н.с.

Якушев Максим Витальевич<sup>2</sup>, зав. лабораторией.

Сидоров Георгий Юрьевич<sup>2</sup>, зав. лабораторией.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский

государственный университет.

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

Тел. (3822) 41-27-72. E-mail: vav43@mail.tsu.ru

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников

им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 14 июня 2018 г.

### Образцы и методики эксперимента

Гетероэпитаксиальные пленки  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из Si (013). Зависимость содержания CdTe (состава  $x$ ) от координаты, отсчитываемой от границы раздела «диэлектрик–полупроводник» вглубь пленки, для образца № 1 приведена на рис. 1. Распределение состава измерялось в процессе эпитаксиального роста при помощи автоматического эллипсометра. Согласно холловским измерениям при температуре 77 К, подвижность дырок составляет  $365 \text{ см}^2/(\text{В с})$ , а удельная проводимость –  $0,24 (\text{Ом}^{-1} \text{ см}^{-1})$ . Время жизни, определенное при помощи бесконтактной СВЧ-методики, при температуре 77 К составляло 36–55 нс. С обеих сторон рабочего слоя формировались варизонные слои с повышенным составом. Сверху варизонного слоя *in situ* в процессе роста наносился слой CdTe толщиной 0,25 мкм. Для структуры № 1 сверху слоя CdTe при помощи плазменного атомно-слоевого нанесения формировался диэлектрический слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [5, 6]. Для структуры № 2 диэлектрик  $\text{Al}_2\text{O}_3$  наносился после удаления приповерхностного слоя пленки толщиной около 1 мкм в результате травления в растворе  $\text{Vt}_2\text{-HBr}$ .

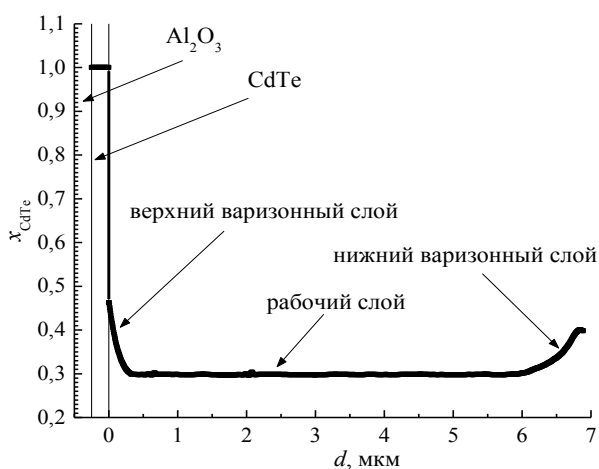


Рис. 1. Распределение содержания CdTe  $x_{\text{CdTe}}$  от координаты  $d$  эпитаксиальной пленки  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  (структура № 1).

Полевые электроды на поверхности диэлектрика создавались из индия. Для каждой МДП-структуры определялась площадь полевого электрода, которая составила для структуры № 1 величину  $0,212 \text{ мм}^2$ , а для структуры № 2 –  $0,135 \text{ мм}^2$ . Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки при измерениях принимается изменение напряжения от отрицательных

значения к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 показаны экспериментальные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур на основе МЛЭ  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  с варизонным слоем (№ 1) и без слоя (№ 2), измеренные при температуре 77 К при прямой и обратной развертке напряжения при различных частотах. Из рис. 2 видно, что емкость диэлектрика для структуры № 1 с промежуточным слоем CdTe составляет около 55 пФ, что связано с большей толщиной диэлектрического слоя (чем у структуры № 2). ВФХ на частоте 2 кГц имеют низкочастотный (НЧ) вид относительно времени формирования инверсионного слоя. Гистерезис несколько больше для структуры с варизонным слоем, также для этой структуры (№ 1) больше ширина провала ВФХ. Можно отметить, что для структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  с промежуточным слоем CdTe гистерезис практически отсутствует при малом диапазоне изменения напряжения [7]. Определены концентрации дырок по значению емкости в минимуме НЧ ВФХ [8–10], которые для образцов № 1 и № 2 при температуре 77 К составили  $2,20 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $1,45 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Концентрации, определенные при 77 К по высокочастотному (ВЧ) виду ВФХ [8–10], для структур № 1 и № 2 оказались близкими:  $2,20 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $1,36 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  соответственно.

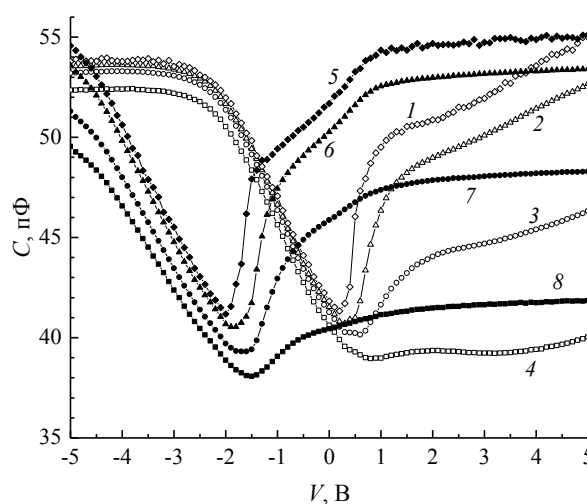


Рис. 2. Зависимости емкости  $C$  от напряжения  $V$  для МДП-структуры на основе  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  с варизонным слоем (№ 1), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 1–4) и обратной (кр. 5–8) развертке напряжения на разных частотах, кГц: 2 (кр. 1, 5), 20 (кр. 2, 6), 50 (кр. 3, 7), 100 (кр. 4, 8).

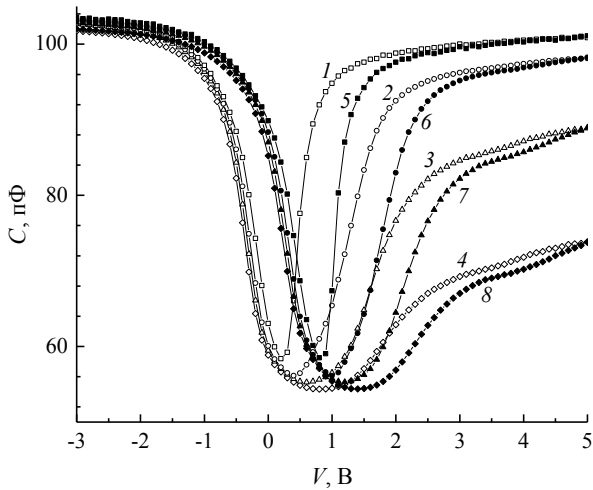


Рис. 3. Зависимости емкости  $C$  от напряжения  $V$  для МДП-структуры на основе  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  без варизонного слоя (№ 2), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 1–4) и обратной (кр. 5–8) развертке напряжения на разных частотах, кГц: 2 (кр. 1, 5), 20 (кр. 2, 6), 50 (кр. 3, 7), 100 (кр. 4, 8).

На рис. 4 приведены ВФХ МДП-структуры № 2, измеренные при температуре 120 К при прямой развертке напряжения при разных частотах.

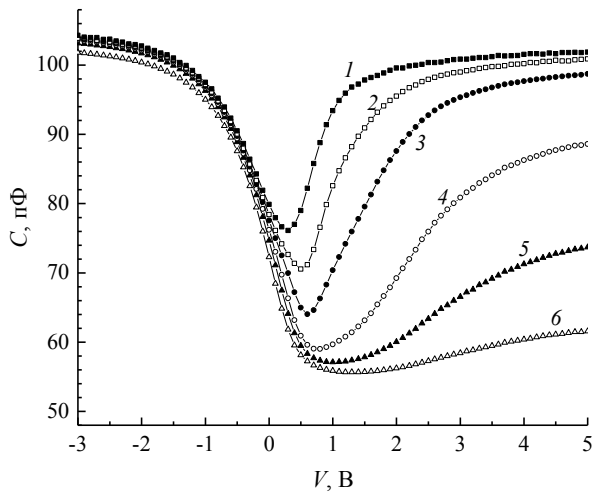


Рис. 4. Зависимости емкости  $C$  от напряжения  $V$  для МДП-структуры на основе  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  без варизонного слоя (№ 2), измеренные при температуре 120 К при прямой развертке напряжения на разных частотах, кГц: 2 (кр. 1), 10 (кр. 2), 20 (кр. 3), 50 (кр. 4), 100 (кр. 5), 200 (кр. 6).

Из рис. 4 видно, что на минимальной частоте 2 кГц емкость в минимуме НЧ ВФХ близка к 75 пФ и наблюдается частотная дисперсия НЧ емкости. Концентрация дырок, определенная по значению емкости в минимуме НЧ ВФХ (на частоте 2 кГц), составила около  $5,05 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация, найденная из ВЧ ВФХ, оказалась равна  $1,53 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Такое различие связано с тем, что при увеличении температуры уменьшается время перезарядки поверхностных состояний, которые начинают успевать перезаряжаться при изменении

тестового сигнала и вносят вклад в полную емкость МДП-структуры. При температуре 77 К ВФХ имеют ВЧ-вид относительно времени перезарядки поверхностных состояний, что подтверждается близкими значениями концентрации дырок, определенными из минимума ВФХ при более низких температурах (8 К –  $1,41 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 30 К –  $1,45 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 50 К –  $1,43 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

На рис. 5 приведены зависимости произведения дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) в режиме сильной инверсии на площадь полевого электрода ( $R_{\text{опз}}A$ ) от обратной температуры для структур № 1 и № 2. При этом для структуры с варизонным слоем и промежуточным диэлектриком CdTe значения  $R_{\text{опз}}A$  больше, чем для структуры без варизонного слоя в 10–100 раз в зависимости от температуры. Структура № 2, выращенная на Si-подложке, имеет малые значения  $R_{\text{опз}}A$  по сравнению со структурами, выращенными на подложках из GaAs [11]. Для структуры № 1 в диапазоне температур 50–100 К доминирует генерация Шокли-Рида в ОПЗ, а для структуры № 2 доминируют процессы туннельной генерации.

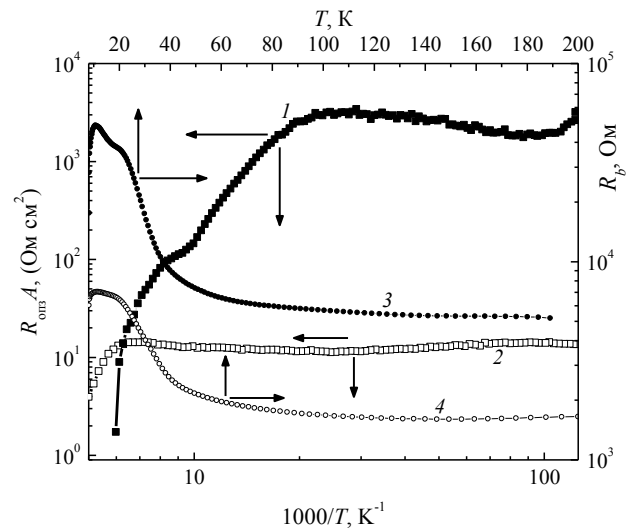


Рис. 5. Зависимости  $R_{\text{опз}}A$  от обратной температуры для МДП-структур на основе  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  с варизонным слоем № 1 (кр. 1) и без слоя № 2 (кр. 2), измеренные на частоте 10 кГц, а также зависимости сопротивления объема эпитаксиальной пленки  $R_p$  от температуры  $T$  на частоте 1 МГц для структур с варизонным слоем (кр. 3) и без слоя (кр. 4).

### Закключение

Таким образом, в широком диапазоне температур и частот исследован адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}/\text{Si}(013)$  с различными диэлектриками и разными распределениями состава в приповерхностной области. Установлено, что ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ  $p\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  без варизонного слоя имеют

при 77 К высокочастотный вид относительно времени перезарядки быстрых поверхностных состояний (в отличие от случая  $x = 0,21-0,23$ ). Показано, что для структуры с варизонным слоем значения дифференциального сопротивления ОПЗ в 10–100 раз больше, чем для структуры без варизонного слоя. Этот результат не является очевидным и может быть объяснен увеличением ширины запрещенной зоны вблизи поверхности HgCdTe, а также возможным снижением дефектности в приповерхностном слое эпитаксиальной пленки из-за более качественной границы раздела HgCdTe/CdTe (по сравнению с границей раздела HgCdTe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научных проектов № 16-42-700759 и 18-43-700005.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

2. Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.

3. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. // ФТП. 2001. Т. 35. № 9. С. 1092.

4. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Кузьмин В. Д., Ремесник В. Г. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 5. С. 62.

5. Fu R., Pattison J. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003.

6. Zhang P., Ye Z. H., Sun C. H., Chen Y. Y., Zhang T. N., Chen X., Lin C., Ding R. J., He L. // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. No. 9. P. 4716.

7. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Sidorov G. Y. // Superlatt. Microstr. 2017. Vol. 111. P. 1195.

8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Phys. Chem. Sol. 2017. Vol. 102. P. 42.

9. Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 54.

10. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Electron. Mater. 2018. Vol. 47. P. 2694.

11. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Sidorov G. Y. // Infrared Phys. Technol. 2017. Vol. 87. P. 129.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga

## Features of the admittance of MIS structures based on MBE $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ( $x = 0.30$ )

A. V. Voitsekhovskii<sup>1</sup>, S. N. Nesmelov<sup>1</sup>, S. M. Dzyadukh<sup>1</sup>, V. S. Varavin<sup>2</sup>, S. A. Dvoretzky<sup>1,2</sup>, N. N. Mikhailov<sup>2</sup>, M. V. Yakushev<sup>2</sup>, and G. Yu. Sidorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University  
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

<sup>2</sup> Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS  
13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Received June 14, 2018

*In a wide range of temperatures and frequencies, the admittance of MIS-structures based on MBE  $p\text{-Hg}_{0.70}\text{Cd}_{0.30}\text{Te/Si(013)}$  with different dielectrics and different composition distributions in the near-surface region has been investigated. It has been established that the capacitance-voltage characteristics (at 77 K) of the MIS structures based on MBE  $p\text{-Hg}_{0.70}\text{Cd}_{0.30}\text{Te}$  without a graded-gap layer has high-frequency behavior relatively to the time of charge exchange of fast surface states (in contrast to the case of  $x = 0.21-0.23$ ). It is shown that for a structure with a graded-gap layer, the value of the differential resistance of space-charge region is 10–100 times greater than for a structure without a graded-gap layer. This result is not obvious and can be explained by an increase in the width of the band gap near the surface, as well as by a decrease in defectiveness in the near-surface layer of HgCdTe when the CdTe layer is grown.*

**Keywords:** HgCdTe, molecular beam epitaxy, MIS structure, graded-gap layer, admittance, capacitance-voltage characteristic.

## REFERENCES

1. P. Capper and J. Garland, *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications* (John Wiley & Sons, Chichester, 2011).
2. A. Rogalski, *Infrared detectors: 2nd. ed.* (CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011).
3. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretiskii, V. S. Varavin, et al., *Semiconductors*, **35**, 1045 (2001).
4. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russ. Phys. J.*, **57**, 633 (2014).
5. R. Fu, J. Pattison, *Opt. Engin.*, **51**, 104003 (2012).
6. P. Zhang, Z. H. Ye, C. H. Sun, et al., *J. Electron. Mater.*, **45**, 4716 (2016).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Superlatt. Microstr.*, **111**, 1195 (2017).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *J. Phys. Chem. Sol.*, **102**, 42 (2017).
9. A. V. Voitsekhovskii, N. A. Kulchitsky, S. N. Nesmelov, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (1), 54 (2017).
10. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *J. Electron. Mater.*, **47**, 2694 (2018).
11. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Infrared Phys. Technol.*, **87**, 129 (2017).