

УДК 621.315.592

## Влияние варизонного слоя на адмиттанс МДП-структур с диэлектриком $Al_2O_3$ на основе $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ( $x = 0,22—0,23$ )

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

*Экспериментально исследовано влияние наличия приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe на адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ  $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $x = 0,22—0,23$ ) с  $Al_2O_3$  в качестве диэлектрического покрытия. Показано, что для структур с варизонным слоем характерна большая глубина и ширина провала емкости на низкочастотной вольт-фарадной характеристике, а также большие значения дифференциального сопротивления области пространственного заряда, чем для структур без варизонного слоя. Установлено, что основные особенности гистерезиса емкостных зависимостей, характерные для варизонных структур с  $SiO_2/Si_3N_4$ , наблюдаются и для МДП-структур с  $Al_2O_3$ . Причины увеличения гистерезиса ВФХ при создании варизонного слоя в структурах с  $SiO_2/Si_3N_4$  или с  $Al_2O_3$  остаются дискуссионными, хотя можно предположить, что определенную роль в формировании гистерезиса играет кислород.*

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

*Ключевые слова:* МДП-структура, HgCdTe, оксид алюминия, варизонный слой, адмиттанс, вольт-фарадная характеристика, гистерезис.

### Введение

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор теллурид кадмия и ртути широко применяется при создании высокочувствительных инфракрасных детекторов [1, 2]. Ширина запрещенной зоны  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  зависит от содержания CdTe, что позволяет создать на основе данного материала детекторы для различных спектральных областей.

Одним из основных типов детекторов на основе узкозонного полупроводникового твердого раствора  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  являются матричные фотодиоды для спектрального диапазона окна прозрачности атмосферы 8—12 мкм, которые создаются на основе  $p-n$ -переходов из  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  при  $x = 0,21—0,23$  [1—3].

Перспективным методом выращивания HgCdTe является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), которая позволяет выращивать пленки с заданным распределением состава по толщине эпитаксиальной пленки. Эта возможность используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов, например, путем создания приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe. Создание таких слоев позволяет улучшить пороговые характеристики инфракрасных детекторов на основе HgCdTe за счет снижения влияния поверхностной рекомбинации на время жизни фотоносителей в объеме эпитаксиальной пленки [3, 4]. Характеристики детекторов на основе HgCdTe во многом зависят от параметров диэлектрических пассивирующих покрытий и границ раздела их с полупроводником [5], поэтому исследование характеристик МДП-структур на основе гетероэпитаксиального HgCdTe МЛЭ остается актуальной задачей.

Войцеховский Александр Васильевич, зав. кафедрой<sup>1</sup>.  
Несмелов Сергей Николаевич, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Дзядх Станислав Михайлович, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией<sup>2</sup>.  
Варавин Василий Семенович, старший научный сотрудник<sup>2</sup>.  
Дворецкий Сергей Алексеевич, зав. лабораторией<sup>1,2</sup>.  
Михайлов Николай Николаевич, старший научный сотрудник<sup>2</sup>.  
Якушев Максим Витальевич, ведущий научный сотрудник<sup>2</sup>.  
Сидоров Георгий Юрьевич, научный сотрудник<sup>2</sup>.

<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 СО РАН.  
Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.  
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

© Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сидоров Г. Ю., 2016

Возможности применения традиционных методов характеризации пассивирующих покрытий путем исследования электрофизических характеристик МДП-структур [6] ограничены особенностями МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe, а именно, большим значением сопротивления объема эпитаксиальной пленки, а также возможным наличием приповерхностного варизонного слоя. Экспериментальные исследования свойств МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe с приповерхностным варизонным слоем пока немногочисленны [7—14], причем в качестве диэлектриков использовались SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [7—11], анодный оксид [7] или CdTe [14]. Перспективным пассивирующим покрытием является оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сформированный методом плазменного нанесения атомарных слоев (PE ALD) [15], которое может создаваться при температурах, близких к комнатной, и эффективно решает проблему рекомбинации неосновных носителей заряда на границе раздела.

Целью данной работы являются экспериментальные исследования влияния наличия приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe на адмиттанс (полную комплексную проводимость для гармонического сигнала) МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,22\text{—}0,23$ ) с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в качестве диэлектрического покрытия.

### Образцы и методики эксперимента

Исследуемые гетероэпитаксиальные структуры на основе  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,22\text{—}0,23$ ) были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из Si(013). При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным составом ( $x$ ). До нанесения диэлектрических покрытий для исследуемых гетероструктур при помощи метода Холла были определены концентрации основных носителей, подвижности электронов и проводимости. Времена жизни неосновных носителей определялось при помощи бесконтактной СВЧ-методики. Технологические параметры некоторых исследованных гетероструктур приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены электрические параметры гетероструктур. Для структур № 2 и № 4 проводилось предварительное удаление приповерхностного варизонного слоя путем травления поверхности в растворе Br<sub>2</sub>—HBr, а затем наносился диэлектрик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 70 нм. Для структур № 1 и № 3 диэлектрик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> наносился сверху варизонного слоя. Распределение состава по толщине пленки для структур № 1 и № 3, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста, показано на рис. 1.

Таблица 1

Технологические параметры гетероструктур

| № структуры | Состав на поверхности | Толщина верхнего варизонного слоя, мкм | Толщина нижнего варизонного слоя, мкм | Состав в рабочем слое | Толщина рабочего слоя, мкм |
|-------------|-----------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 1           | 0,46                  | 0,5                                    | 1,0                                   | 0,22                  | 6,3                        |
| 2           | 0,22                  | нет                                    | 1,0                                   | 0,22                  | 6,3                        |
| 3           | 0,43                  | 0,5                                    | 1,3                                   | 0,23                  | 7,9                        |
| 4           | 0,23                  | нет                                    | 1,3                                   | 0,23                  | 7,9                        |

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур (T=77 К)

| № структуры | Концентрация основных носителей заряда, см <sup>-3</sup> | Подвижность основных носителей заряда, см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup> | Проводимость, Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup> | Время жизни, мкс |
|-------------|--|--|---|------------------|
| 1,2         | $5,4 \times 10^{14}$                                     | 34000  | 3,1   |                  |
| 3,4         | $3,4 \times 10^{14}$                                     | 69000  | 3,9   | 5,1÷7,2          |

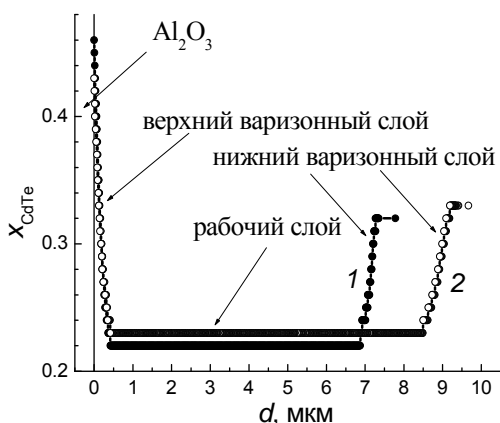


Рис. 1. Зависимость содержания CdTe ( $x_{\text{CdTe}}$ ) в относительных долях толщины пленки  $d$  для структур № 1 (кривая 1) и № 2 (кривая 2) на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенного методом МЛЭ.

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического кристата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A [8, 9]. За прямое направление развертки при измерениях принимается изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развертки — от положительных к отрицательным.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур № 1 и № 2, измеренные на частоте 10 кГц при температурах 77 К и на частоте 100 кГц при 10 К соответственно при прямой и обратной развертке напряжения. Из рис. 2 видно, что для структуры № 1 с варизонным слоем ярко выражен гистерезис, связанный с захватом носителей заряда на медленные состояния в диэлектрике и на границе раздела [16]. Гистерезис ВФХ для структуры № 2 без варизонного слоя относительно мал. Глубина и ширина провала низкочастотной ВФХ для структуры № 1 с варизонным слоем значительно больше, чем для структуры № 2 без варизонного слоя.

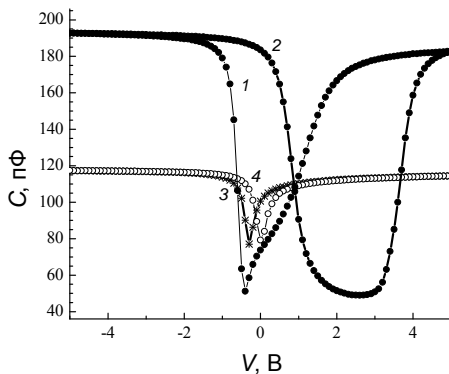


Рис. 2. Зависимости емкости  $C$  от напряжения смещения  $V$  МДП-структуры на основе  $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$  с варизонным слоем (№ 1, кривые 1, 2) и без варизонного слоя (№ 2, кривые 3, 4), измеренные при температуре 77 К при прямой (кривые 1, 3) и обратной (кривые 2, 4) развертке напряжения на частоте 10 кГц.

При температуре 10 К ВФХ на частоте 100 кГц принимает для структуры № 1 с варизонным слоем высокочастотный вид, а для структуры № 2 без варизонного слоя вид ВФХ близок к низкочастотному. Для структуры № 2 без варизонного слоя при температуре 10 К наблюдается уменьшение значений емкости в минимуме низкочастотной ВФХ при увеличении частоты, которое связано с уменьшением вклада емкости перезарядки поверхностных состояний в полную емкость структуры. Для структур с варизонными слоями частот-

ная дисперсия не наблюдается, поскольку ВФХ при температурах 10—77 К имеет высокочастотный вид относительно времени перезарядки поверхностных состояний [17, 18].

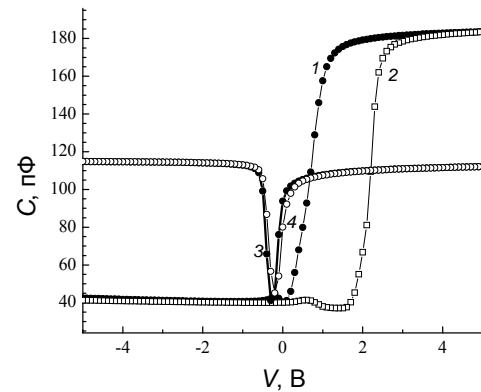


Рис. 3. Зависимости емкости  $C$  от напряжения смещения  $V$  МДП-структуры на основе  $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$  с варизонным слоем (№ 1, кривые 1, 2) и без варизонного слоя (№ 2, кривые 3, 4), измеренные при температуре 10 К при прямой (кривые 1, 3) и обратной (кривые 2, 4) развертке напряжения на частоте 100 кГц.

ВФХ МДП-структур № 3 и № 4, измеренные на частоте 10 кГц при температуре 77 К при прямой и обратной развертке напряжения, показали, что для структуры № 3 с варизонным слоем наблюдается значительно больший гистерезис, а низкочастотные ВФХ для структуры № 3 имеют более глубокий и широкий провал емкости по сравнению со структурой № 4 без варизонного слоя.

На рис. 4 приведены температурные зависимости дифференциального сопротивления области пространственного заряда ( $R_{\text{ОПЗ}}$ ) в режиме сильной инверсии для структур № 1—№ 4, определенные на частоте 100 кГц при прямой развертке напряжения. Из рисунка следует, что  $R_{\text{ОПЗ}}$  больше для структур № 1 и № 3 с варизонными слоями.

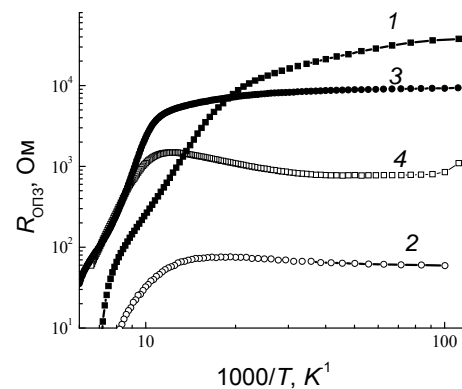


Рис. 4. Зависимости дифференциального сопротивления  $R_{\text{ОПЗ}}$  от обратной температуры для МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,22$ , структуры № 1, 2 — кривые 1, 2 и  $x = 0,23$ , структуры № 3, 4 — кривые 3, 4) с варизонным слоем (кривые 1, 2) и без варизонного слоя (кривые 3, 4), измеренные в сильной инверсии при прямой развертке напряжения на частоте 100 кГц.

Высокотемпературный спад  $R_{\text{ОПЗ}}$  связан с диффузией неосновных носителей заряда из объема к поверхности. Большие значения  $R_{\text{ОПЗ}}$  в структурах на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,21\text{—}0,23$ ) с варизонным слоем связаны с подавлением процессов туннелирования через глубокие уровни [8]. Вероятно, что для структур с варизонным слоем  $R_{\text{ОПЗ}}$  ограничено процессами генерации Шокли-Рида, хотя моделирование с использованием выражений из [19] приводит к более резкой зависимости  $R_{\text{ОПЗ}}(T)$ , чем экспериментальная.

### Заключение

В работе исследовано влияние приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe на адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,22\text{—}0,23$ ) с диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ожидаемым результатом является большая глубина и ширина провала емкости на низкочастотной ВФХ для структур с варизонным слоем. Аналогичный результат был получен ранее для МДП-структур на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,21\text{—}0,23$ ) с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  [8, 9]. Большая глубина и ширина провала емкости на низкочастотной ВФХ для структур с варизонным слоем связана с тем, что для варизонных структур меньше собственная концентрация у границы раздела, что приводит к изменению зависимости поверхностного потенциала от напряжения [20]. Гистерезис ВФХ в МДП-структурах на основе  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,21\text{—}0,23$ ) с  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  определяется перезарядкой «медленных» состояний, расположенных вблизи границы раздела [16].

Все основные особенности гистерезиса, установленные для структур с  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ , наблюдаются и для МДП-структур с  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Небольшим отличием является то, что значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ для структур с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  могут оказаться близкими при прямой и обратной развертке напряжения (структура № 1). Это может быть связано с тем, что в структуре № 1 в переходном слое мала концентрация перезаряжающихся под действием напряжения подлежащих дефектов.

Причины увеличения гистерезиса ВФХ при создании варизонного слоя в структурах с  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  или с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  остаются дискуссионными, хотя можно предположить, что определенную роль в формировании гистерезиса играет кислород (подобный гистерезис наблюдался для структур с анодным оксидом, но был крайне мал для структур с выращенным *in situ* CdTe [14]). Большие значения  $R_{\text{ОПЗ}}$  в структурах на основе МЛЭ  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

( $x = 0,21\text{—}0,23$ ) с варизонным слоем связаны с подавлением процессов туннелирования через глубокие уровни [8].

*Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700759.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed. — New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
2. Capper P. and Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. — Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
3. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. Марричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
4. 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.
5. Agnihorti O. P., Musca C. A., Faraone L. // Semicond. Sci. Tech. 1998. Vol. 13. P. 839.
6. Nicollian E. H. and Brews J. R. MOS (metal oxide semiconductor) Physics and Technology. — New York et al.: Wiley, 1982.
7. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Машуков Ю. П., Захарьяш Т. И., Васильев В. В., Варавин В. С., Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 2. С. 35.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Vasil'ev V. V., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Kuz'min V. D., Remesnik V. G. // Russian Phys. J. 2014. Vol. 57. No. 4. P. 536.
9. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Opto-Electronics Review. 2014. Vol. 22. No. 4. P. 236.
10. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Vasil'ev V. V., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V. // Infrared Phys. Technol. 2015. Vol. 71. P. 236.
11. Ovsyuk V. N., Yartsev A. V. // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6636. P. 663617.
12. Vasil'ev V. V., Mashukov Yu. P. // Semiconductors. 2007. Vol. 41. P. 37.
13. Горн Д. И., Несмелов С. Н., Войцеховский А. В., Коханенко А. П. // Изв. вузов. Физика. 2008. № 9-3. С. 134.
14. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov Yu. G., Yakushev M. V. // Opto-Electronics Review. 2010. Vol. 18. No. 3. P. 263.
15. Fu R. and Pattison J. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003-1.
16. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Russian Phys. J. 2015. Vol. 58. No. 4. P. 540.
17. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. No. 2. P. 881.
18. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 2. С. 105.
19. He W., Celik-Butler Z. // Solid-State Electron. 1996. Vol. 39. No. 1. P. 127.
20. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Бурлаков И. Д., Селяков А. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 80.

## Impact of graded-gap layer on the admittance of MIS structures based on MBE $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ( $x = 0.22\text{—}0.23$ ) with $\text{Al}_2\text{O}_3$ insulator

A. V. Voitsekhovskii<sup>1</sup>, S. N. Nesmelov<sup>1</sup>, S. M. Dzyadukh<sup>1</sup>, V. V. Vasil'ev<sup>2</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>, 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 8, 2016

*The effect of the presence of near-surface graded-gap layers with a high content of CdTe on admittance of MIS structures based on MBE  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0.22\text{—}0.23$ ) with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as a insulator coating was experimentally investigated. It was shown that structures with graded-gap layer is characterized by greater depth and width of the capacitance dip in the low-frequency capacitance-voltage characteristics, and high values of differential resistance of space charge region than for structures without a graded-gap layer. It was established that the main features of the hysteresis of capacitive dependencies typical for graded-gap structures with  $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$ , observed for MIS structure with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  insulator. The reasons for the increase of hysteresis for CV characteristics when creating graded-gap layer in structures with  $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$  or  $\text{Al}_2\text{O}_3$  remain debatable, although it can be assumed that a certain role of oxygen in the hysteresis formation.*

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

**Keywords:** MIS structure, HgCdTe, aluminum oxide, graded-gap layer, admittance, capacitance-voltage characteristics, hysteresis.

### REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared detectors: 2nd. ed.* (CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011).
2. P. Capper and J. Garland, *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications* (John Wiley & Sons, Chichester, 2011).
3. V. N. Ovsyuk, G. L. Kuryushev, and Yu. G. Sidorov, *Matrix Photodetectors for Infrared Range* (Nauka, Novosibirsk, 2001) [in Russian].
4. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzky, V. S. Varavin, et al., *Semiconductors*, **35**, 1045 (2001).
5. O. P. Agnihorti, C. A. Musca, and L. Faraone, *Semicond. Sci. Tech.*, **13**, 839 (1998).
6. E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology* (Wiley, New York, 1982).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, A. P. Kokhanenko, et al., *Russ. Phys. J.*, **48**, 143 (2005).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russian Phys. J.*, **57**, 536 (2014).
9. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, *Opto-Electron. Rev.*, **22**, 236 (2014).
10. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Infrared Phys. Technol.*, **71**, 236 (2015).
11. V. N. Ovsyuk and A. V. Yartsev, *Proc. SPIE*, **6636**, 663617 (2007).
12. V. V. Vasil'ev and Yu. P. Mashukov, *Semiconductors*, **41**, 37 (2007).
13. D. I. Gorn, S. N. Nesmelov, A. V. Voitsekhovskii, and A. P. Kokhanenko, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz.*, No. 9-3, 134 (2008).
14. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al. // *Opto-Electron. Rev.*, **18**, 263 (2010).
15. R. Fu and J. Pattison, *Optical Engineering*, **51**, 104003-1 (2012).
16. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russian Phys. J.*, **58**, 540 (2015).
17. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *J. Electron. Mater.*, **45**, 881 (2016).
18. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz.*, **59**, 105 (2016).
19. W. He and Z. Celik-Butler, *Solid-State Electron.*, **39**, 127 (1996).
20. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 80 (2011).