

УДК 621.315.592

Свойства границы раздела в МДП-структурах на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29—0,39$) с двухслойным диэлектриком $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$

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 исследованы параметры пассивирующих слоев Al_2O_3 и двухслойного диэлектрика $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ путем измерения адмиттанса МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29—0,39$) с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием CdTe . Показано, что структура с двухслойным диэлектриком $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ имеет по сравнению со структурой с одним слоем Al_2O_3 существенно меньшие значения плотности медленных состояний на границе раздела (в 50—100 раз) и плотности быстрых поверхностных состояний (в 50—100 раз). Можно сделать вывод, что двухслойный диэлектрик $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ образует качественную границу раздела с $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,39$).

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

Ключевые слова: МДП-структура, теллурид кадмия ртути, оксид алюминия, теллурид кадмия, адмиттанс, плотность медленных состояний, спектр быстрых поверхностных состояний.

Введение

Важной задачей при создании высокочувствительных инфракрасных детекторов на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ является выбор пассивирующего покрытия [1]. Основными параметрами пассивирующего покрытия являются напряжение плоских зон, заряд в диэлектрике, плотность медленных состояний на границе раздела, а также плотность быстрых поверхностных состояний [2].

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии предоставляет возможность выращивания пленок

HgCdTe с заданным распределением по толщине состава (содержания CdTe), что используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов. Создание приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием CdTe позволяет уменьшить влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в объеме HgCdTe [3, 4].

Возможности применения традиционных методов характеризации пассивирующих покрытий путем исследования электрофизических характеристик МДП-структур [5] ограничены особенностями МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe [6—9], а именно, большим значением сопротивления объема эпитаксиальной пленки, а также возможным наличием приповерхностного варизонного слоя. К настоящему времени исследованы комбинации HgCdTe , выращенного объемными методами или жидкофазной эпитаксией, с различными диэлектрическими покрытиями [1, 2]. Для пассивации HgCdTe хорошо подходит теллурид кадмия, но поиски новых пассивирующих покрытий для специальных случаев продолжают и сегодня. Например, на основе CdTe нельзя создать антиотражающее покрытие при фронтальной засветке инфракрасного детектора из-за большого показателя преломления материала, поэтому для решения этой проблемы используют двухслойный диэлектрик CdTe/ZnS [2]. Перспективным пассивирующим покрытием является оксид алюминия Al_2O_3 , сформированный методом плазменного на-

Войцеховский Александр Васильевич, зав. кафедрой¹.
Несмелов Сергей Николаевич, старший научный сотрудник¹.
Дзядх Станислав Михайлович, старший научный сотрудник¹.
Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией².
Варавин Василий Семенович, старший научный сотрудник².
Дворецкий Сергей Алексеевич, зав. лабораторией^{1,2}.
Михайлов Николай Николаевич, старший научный сотрудник².
Якушев Максим Витальевич, ведущий научный сотрудник².
Сидоров Георгий Юрьевич, научный сотрудник².

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет.

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

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

² 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

несения атомарных слоев (PE ALD) [10, 11], которое может создаваться при температурах, близких к комнатной.

Целью данной работы является исследование параметров пассивирующих слоев Al_2O_3 и двухслойного диэлектрика $CdTe/Al_2O_3$ путем измерения адмиттанса МДП-структур на основе МЛЭ $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,29—0,39$) с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием $CdTe$.

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые гетероэпитаксиальные структуры на основе $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,29—0,39$) 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. Для структуры № 2 поверх верхнего варизонного слоя $HgCdTe$ выращивался *in situ* слой $CdTe$ толщиной 0,25 мкм, а рабочий слой $HgCdTe$ легировался индием. Электронный тип проводимости в структуре № 1 обеспечивался собственными дефектами донорного типа и неконтролируемыми примесями. Слой Al_2O_3 толщиной 70 нм наносился для структуры № 1 сверху варизонного слоя, а для структуры № 2 — сверху слоя $CdTe$. Распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки для

структуры № 2, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста, показано на рис. 1. До нанесения диэлектрических покрытий для исследуемых гетероструктур при помощи метода Холла были определены концентрации и подвижности электронов, а также проводимости. Времена жизни неосновных носителей определялись при помощи бесконтактной СВЧ методики. Технологические параметры некоторых исследованных гетероструктур приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены электрические параметры гетероструктур при 77 К.

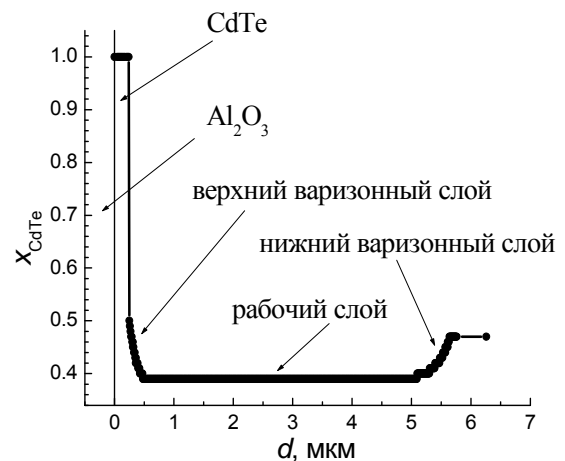


Рис. 1. Зависимость содержания $CdTe$ в единицах x_{CdTe} от толщины пленки d для структуры № 2 на основе МЛЭ $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

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	1,3	0,29	5,7
2	0,50	0,2	1,1	0,39	4,7

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур

№ структуры	Концентрация основных носителей заряда, $см^{-3}$	Подвижность основных носителей заряда, $см^2В^{-1}с^{-1}$	Проводимость, $Ом^{-1}см^{-1}$	Время жизни, мкс
1	$2,5 \times 10^{14}$	9500	0,36	0,15—0,22
2	$2,0 \times 10^{15}$	4700	1,5	0,04—0,06

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 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур № 1 и № 2, измеренные при температуре 77 К на частотах 100 и 20 кГц соответственно, причем при прямой и обратной развертках напряжения. Из рисунка видно, что для структуры № 1 ярко выражен гистерезис,

связанный с захватом носителей заряда на медленные состояния в диэлектрике и на границе раздела. Емкость диэлектрика близка к 163,8 пФ, а площадь полевого электрода равна 0,232 мм². Заметим, что гистерезис ВФХ для структуры № 2 мал. Емкость диэлектрика для структуры № 2 близка к 36,5 пФ, а площадь полевого электрода равна 0,149 мм².

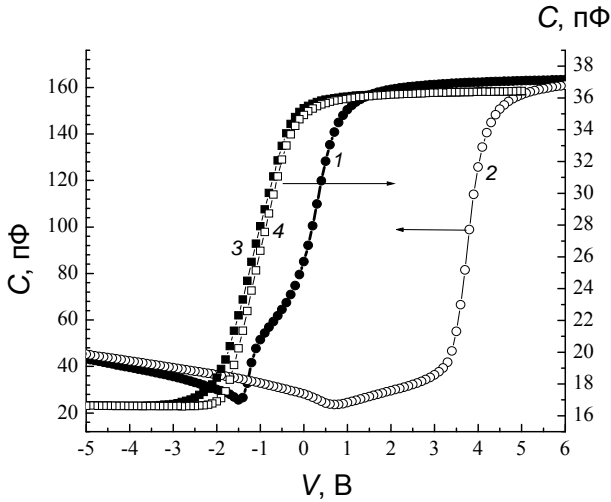


Рис. 2. Зависимости емкости C от напряжения смещения V для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29$, структура №1, кр. 1, 2) и на основе ($x = 0,39$, структура № 2, кр. 3, 4), измеренные при температуре 77 К на частотах 100 и 20 кГц соответственно, при прямой (кр. 1, 3) и обратной (кр. 2, 4) развертках напряжения.

Для структуры № 1 по наклону зависимости $1/C^2(V)$ в режиме обеднения была определена концентрация электронов в приповерхностном слое полупроводника [5], которая оказалась равна $1,47 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Определенная таким способом концентрация основных носителей обычно больше реальной из-за действия поверхностных состояний. Поэтому путем численного решения уравнения Пуассона с учетом реального распределения состава по координате находились идеальные высокочастотные ВФХ для МДП-структуры № 1 с варизонным слоем [12—14]. Совпадение расчетного и экспериментального минимальных значений емкости наблюдалось при концентрации электронов $3,38 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Такой концентрации электронов соответствует емкость плоских зон 109,2 пФ, а напряжения плоских зон при прямой V_{fbF} и обратной V_{fbR} развертке напряжения оказались равны 0,28 и 3,85 В соответственно.

Для структуры № 2 по наклону зависимости $1/C^2(V)$ в режиме обеднения определена концентрация электронов, которая оказалась равна $2,19 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В результате моделирования высокочастотных ВФХ получена концентрация элект-

тронов $1,95 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Такой концентрации соответствует емкость плоских зон 33,96 пФ, а V_{fbF} и V_{fbR} развертке напряжения оказались равны -0,42 и -0,28 В соответственно. При этом гистерезис ВФХ является минимальным.

Зная напряжения плоских зон можно рассчитать эффективную плотность заряда, который состоит из фиксированного заряда в диэлектрике и заряда медленных и быстрых поверхностных состояний, при прямой D_{effF} и обратной D_{effR} развертке напряжения. Также рассчитаны плотности медленных состояний D_{ss} на границе раздела (из гистерезиса ВФХ [15]) и спектры быстрых поверхностных состояний ($N_{SS}(E)$ методом Термана [5], которые приведены на рис. 3. Видно, что для структуры № 2 плотность поверхностных состояний возрастает к краю зоны проводимости и минимальна в середине запрещенной зоны. Для структуры № 1 в середине запрещенной зоны существует широкий максимум поверхностных состояний. Минимальная плотность поверхностных состояний для структуры № 1 почти на два порядка больше, чем для структуры № 2. Параметры структур № 1 и № 2, определенные из измерений ВФХ при температуре 77 К, приведены в табл. 3. Из неё следует, что структура № 2 с двухслойным диэлектриком $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ имеет по сравнению со структурой № 1 с одним слоем Al_2O_3 существенно меньшие значения плотности эффективного заряда (в 2—40 раз), плотности медленных состояний на границе раздела (в 50—100 раз), плотности быстрых поверхностных состояний (в 50—100 раз). При нулевом напряжении смещения в структуре № 2 реализуется режим слабого обогащения, а в структуре № 1 — сильной инверсии.

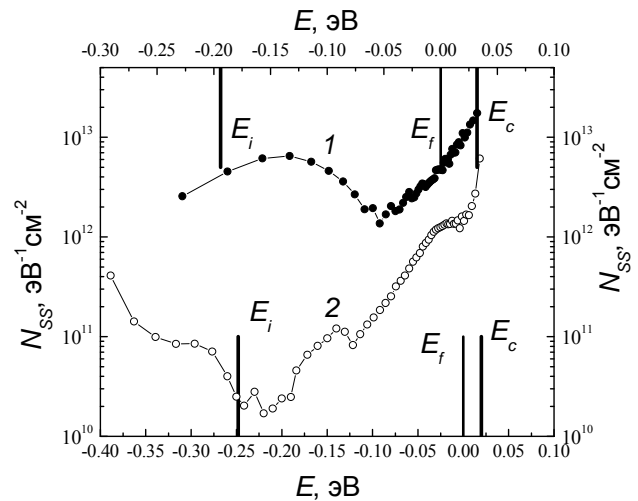


Рис. 3. Зависимости плотности быстрых поверхностных состояний N_{SS} от энергии E для структур № 1 (кр. 1) и № 2 (кр. 2).

Таблица 3

Параметры МДП-структур, определенные из измерений ВФХ при 77 К

№ структуры	$C_{\text{дз}}$, пФ	$V_{\text{fb F}}$, В	$V_{\text{fb R}}$, В	$D_{\text{eff F}}$, см ⁻²	$D_{\text{eff R}}$, см ⁻²	D_{ss} , см ⁻²	N_{ss} , эВ ⁻¹ см ⁻² в минимуме
1	163,8	0,28	3,85	$1,23 \times 10^{11}$	$1,69 \times 10^{12}$	$1,57 \times 10^{12}$	$1,36 \times 10^{12}$
2	36,5	-0,42	-0,28	$6,43 \times 10^{10}$	$4,29 \times 10^{10}$	$2,14 \times 10^{10}$	$1,71 \times 10^{10}$

Таким образом, можно сделать вывод, что двухслойный диэлектрик CdTe/Al₂O₃ образует качественную границу раздела с n-Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0,39$).

Заключение

В работе экспериментально исследованы параметры пассивирующих слоев Al₂O₃ и двухслойного диэлектрика CdTe/Al₂O₃ путем измерения адмиттанса МДП-структур на основе МЛЭ n-Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0,29—0,39$) с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием CdTe. Показано, что для МДП-структур на основе n-HgCdTe с двухслойным диэлектриком CdTe/Al₂O₃ характерны значительно меньшие значения емкости диэлектрика, чем для однослойного диэлектрика Al₂O₃, что связано с большей толщиной двухслойного диэлектрика.

Установлено, что структура с двухслойным диэлектриком CdTe/Al₂O₃ имеет по сравнению со структурой с одним слоем Al₂O₃ существенно меньшие значения плотности эффективного заряда (в 2—40 раза), плотности медленных состояний на границе раздела (в 50—100 раз), плотности быстрых поверхностных состояний (в 50—100 раз). Возможной причиной уменьшения гистерезиса ВФХ для МДП-структуры с двухслойным диэлектриком CdTe/Al₂O₃ является то, что медленные состояния возникают в SiO₂, который для случая двухслойного диэлектрика удален от полупроводника. В минимуме спектра поверхностных состояний для структуры с двухслойным диэлектриком CdTe/Al₂O₃ плотность состояний составляет около $1,7 \times 10^{10}$ эВ⁻¹см⁻², что является очень малым значением для узкозонных полупроводников. При нулевом напряжении смещения в структуре с двухслойным диэлектриком CdTe/Al₂O₃ реализуется режим слабого обогащения, а в структуре с одним слоем Al₂O₃ — сильной инверсии.

Таким образом, можно сделать вывод, что двухслойный диэлектрик CdTe/Al₂O₃ образует качественную границу раздела с n-Hg_{1-x}Cd_xTe

($x = 0,29—0,39$) и хорошо подходит для пассивации инфракрасных детекторов.

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

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. Nicollian E. H. and Brews J. R. MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology. — New York et al.: Wiley, 1982.
6. 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.
7. Горн Д. И., Несмелов С. Н., Войцеховский А. В., Коханенко А. П. // Изв. вузов. Физика. 2008. № 9-3. С. 134.
8. 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.
9. 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.
10. Fu R. and Pattison J. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003-1.
11. Fu R., Pattison J., Chen A. and Nayfeh O. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532I-1.
12. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядох С. М., Бурлаков И. Д., Селяков А. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 80.
13. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. No. 2. P. 881.
14. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядох С. М. // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 2. С. 105.
15. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Russian Phys. J. 2015. Vol. 58. No. 4. P. 540.

The interface properties of MIS structures based on MBE $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.29\text{—}0.39$) with a two-layer insulator $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$

A. V. Voitsekhovskii¹, S. N. Nesmelov¹, S. M. Dzyadukh¹, V. V. Vasil'ev², V. S. Varavin²,
S. A. Dvoretzky^{1,2}, N. N. Mikhailov², M. V. Yakushev², and G. Yu. Sidorov²

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

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

Received June 8, 2016

The parameters of Al_2O_3 passivation layer and a two-layer insulator $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ were experimentally investigated by using the admittance measurements for MIS structures based on MBE $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.29\text{—}0.39$) with near-surface graded-gap layers with a high content of CdTe. It is shown that structure with a two-layer insulator $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ is compared to the structure with single layer of Al_2O_3 significantly lower slow states interface densities (50—100 times) and the fast surface states density (50—100 times). It can be concluded that the two-layer insulator $\text{CdTe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ forms a high-quality interface with the $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.39$).

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

Keywords: MIS structure, mercury cadmium telluride, aluminum oxide, cadmium telluride, admittance, slow states density, fast interface states spectrum.

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. E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology* (Wiley, New York, 1982).
6. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, A. P. Kokhanenko, et al., *Russ. Phys. J.*, **48**, 143 (2005).
7. D. I. Gorn, S. N. Nesmelov, A. V. Voitsekhovskii, and A. P. Kokhanenko, *Izv. Vussh. Uchebn. Zaved., Fiz.*, No. 9-3, 134 (2008).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Infrared Phys. Technol.*, **71**, 236 (2015).
9. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Opto-Electron. Rev.*, **18**, 263 (2010).
10. R. Fu and J. Pattison, *Optical Engineering* **51**, 104003-1 (2012).
11. R. Fu, J. Pattison, A. Chen and O. Nayfeh, *Proc. SPIE* **8353**, 83532I-1 (2012).
12. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 5, 80 (2011).
13. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *J. Electron. Mater.*, **45**, 881 (2016).
14. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Izv. Vussh. Uchebn. Zaved., Fiz.*, **59**, 105 (2016).
15. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russian Phys. J.*, **58**, 540 (2015).