

УДК 621.315.592

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ*, **, С.Н. НЕСМЕЛОВ*, **, С.М. ДЗЯДУХ*, **, Г.Ю. СИДОРОВ***, В.С. ВАРАВИН***, С.А. ДВОРЕЦКИЙ*, ***, Н.Н. МИХАЙЛОВ***, М.В. ЯКУШЕВ***

АДМИТТАНС МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО $Hg_{1-x}Cd_xTe$, ВЫРАЩЕННОГО МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ GaAs И Si

В работе приводятся результаты исследований адмиттанса МДП-структур на основе $n(p)$ - $HgCdTe$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на различных альтернативных подложках (GaAs и Si). Проведен анализ основных параметров МДП-структур на основе $HgCdTe$ n - и p -типа проводимости, состава $x=0.22$.

Ключевые слова: МДП-структура, $HgCdTe$, молекулярно-лучевая эпитаксия, варизонный слой, вольт-фарадная характеристика, альтернативные подложки

В развитых странах мира в настоящее время активно ведутся разработки высокочувствительных матричных фотоприемников на основе теллурида кадмия ртути, действующих в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы (3-5) и (8...14) мкм [1,2]. Развитие современных методов получения $Hg_{1-x}Cd_xTe$, и прежде всего молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1-3], позволило создать матрицы фотодиодов и фоторезисторов достаточно большого формата. Преимуществом альтернативных подложек на основе Si и GaAs по сравнению с согласованными по постоянной решетке подложкам из $CdZnTe$ является снижение стоимости эпитаксиального материала $Hg_{1-x}Cd_xTe$, что особенно важно при массовом производстве фотоприемных устройств [4]. Очевидным достоинством фоточувствительных элементов, выращенных на кремниевых подложках, является их согласование с кремниевой схемой считывания по коэффициенту термического расширения [5]. В настоящее время достаточно подробно исследованы электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального $HgCdTe$, выращенного методом МЛЭ на подложках из GaAs (013) [6-9]. Целью данной работы является исследование электрофизических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$, выращенного методом МЛЭ на подложках из Si, а также сравнительный анализ свойств МДП-структур на основе МЛЭ $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$, выращенных на подложках из Si и GaAs.

Исследуемые гетероэпитаксиальные структуры на основе $n(p)$ - $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$ были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из GaAs(013) и Si (013). При выращивании гетеро-структур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным составом. Технологические параметры структур приведены в табл.1, а электрические параметры – в табл.2.

Табл. 1

Технологические параметры гетероструктур

№	Тип подложки	Тип проводимости рабочего слоя	Состав на поверхности	Толщина верхнего варизонного слоя, мкм	Состав в рабочем слое	Толщина рабочего слоя, мкм
1	GaAs	n	0.465	0.4	0.223	8.4
2	GaAs	p	0.44	0.3	0.220	8.2
3	Si	n	0.45	0.5	0.222	5.8
4	Si	p	0.44	0.5	0.223	13.7

Табл. 2

Электрические параметры гетероструктур (T=78 K)

№	Концентрация основных носителей, $см^{-3}$	Подвижность основных носителей, $см^2В^{-1}с^{-1}$	Проводимость, $Ом^{-1}см^{-1}$	Время жизни, мкс
1	$6.5 \cdot 10^{14}$	98000	10.7	2
2	$1.2 \cdot 10^{16}$	480	0.94	--
3	$2.6 \cdot 10^{15}$	69000	30.5	0.05-0.07
4	$1.5 \cdot 10^{16}$	400	0.95	--

В качестве пассивирующего покрытия для всех структур использовался низкотемпературный двухслойный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ [10]. Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательных значения к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

На рис.1 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ (структуры №1 и №3), измеренные при температуре 77 К на разных частотах при прямой и обратной развертке напряжения. Влияние на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки исключалось для всех исследованных структур [7-9]. Из рис.1 видно, что для структуры №1 типичен большой гистерезис ВФХ, чем для структуры №3, а также то, что ВФХ на частоте 1 МГц для структуры №1 имеет почти высокочастотный вид, в отличие от аналогичной характеристики для структуры №3. На рис.2 приведены ВФХ МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ (структуры №2 и №4), измеренные при температуре 77 К на разных частотах при прямой и обратной развертке напряжения. Из рис.2 видно, что ВФХ структуры №2 (подложка из GaAs) на частоте 1 МГц принимает при 77 К более высокочастотный вид, чем аналогичная ВФХ для структуры №4 (подложка из Si).

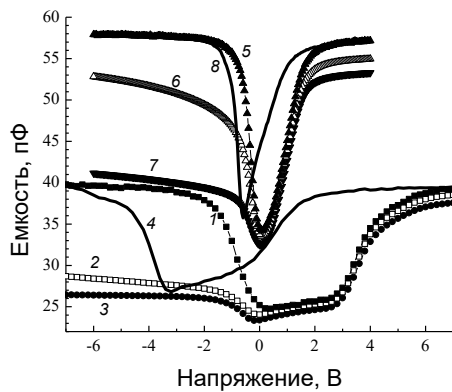


Рис. 1. ВФХ МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с варизонным слоем для структуры №1 (кр. 1-4) и структуры №3 (кр. 5-8), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 4, 8) и обратной (кр. 1-3, 5-7) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 4, 5, 8 – 10; кр. 2, 6 – 200; кр. 3, 7 – 1000

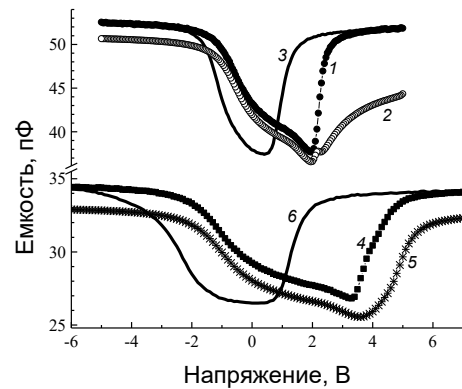


Рис. 2. ВФХ МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с варизонным слоем для структуры №2 (кр. 1-3) и структуры №4 (кр. 4-6), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 3, 6) и обратной (кр. 1, 2, 4, 5) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 3, 4, 5 – 10; кр. 2, 5 – 1000

Для всех структур наблюдался гистерезис инжекционного типа со сходными особенностями. Например, для обеих структур №1 и №3 наклон ВФХ в обеднении более пологий при прямой развертке напряжения, чем при обратной, а в инверсии более пологий наклон при обратной развертке.

По наклону $1/C^2(V)$ зависимости в режиме обеднения для структур №1-№4 определялась концентрация легирующей примеси в приповерхностном слое полупроводника. Затем путем численного решения уравнения Пуассона рассчитывались идеальные ВФХ и находилась емкость плоских зон. В результате сравнения экспериментальных ВФХ с идеальными определялись основные параметры границы раздела для МДП-структур №1-№4, которые приведены в табл. 3.

Т а б л . 3

Параметры МДП-структур, определенные из ВФХ при 77 К

№	Плотность фиксированного заряда, см^{-2}	Плотность подвижного заряда, см^{-2}	Концентрация основных носителей, см^{-3}	Диапазон изменения напряжения, В	Плотность подвижного заряда, нормированная на диапазон изменения напряжения, $\text{см}^{-2}/\text{В}$
1	$1.39 \cdot 10^{11}$	$2.95 \cdot 10^{11}$	$1.48 \cdot 10^{15}$	-10+10	$1.48 \cdot 10^{10}$
2	$1.39 \cdot 10^{11}$	$4.70 \cdot 10^{10}$	$4.20 \cdot 10^{15}$	-5+5	$4.70 \cdot 10^9$
3	$1.38 \cdot 10^{11}$	$6.84 \cdot 10^{10}$	$2.01 \cdot 10^{15}$	-6+4	$6.84 \cdot 10^9$
4	$2.74 \cdot 10^{11}$	$1.51 \cdot 10^{11}$	$5.89 \cdot 10^{15}$	-10+10	$7.55 \cdot 10^9$

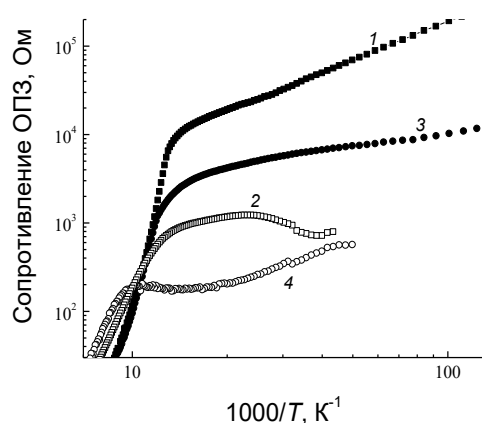


Рис. 3. Зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ от обратной температуры в режиме сильной инверсии для МДП-структур на основе $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$, измеренные на частоте 1 МГц, для структур, №: кр.

структуры №3, выращенной на кремниевой подложке, меньше плотность подвижного заряда, чем для структуры №1, выращенной на подложке из GaAs. Для МДП-структуры на основе n - $HgCdTe$ (структура №3), выращенного на кремниевой подложке, произведение дифференциального сопротивления ОПЗ на площадь ($R_{ОПЗ}A$) при частоте 1 МГц и температуре 77 К достигает значения $5.49 \text{ Ом} \times \text{см}^2$, что сравнимо со значениями $R_{ОПЗ}A$ образцов близкого состава, выращенных на GaAs-подложке около 10 лет назад, но гораздо меньше этой величины для структуры №1 с n - $HgCdTe$ близкого состава, выращенного на GaAs-подложке в 2013 году ($19.7 \text{ Ом} \times \text{см}^2$), а для структуры №4 на основе p - $HgCdTe$, выращенного на подложке из Si, $R_{ОПЗ}A$ при частоте 1 МГц и температуре 77 К мало и составляет $0.549 \text{ Ом} \times \text{см}^2$, что значительно меньше, чем для структуры №2 на основе p - $HgCdTe$ ($2.24 \text{ Ом} \times \text{см}^2$).

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта (№ 8.2.10.2015), в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта р_Сибирь_а № 13-07-98023. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФП СО РАН Васильеву В.В., Кузьмину В.Д., Парму И.О. за помощь в изготовлении структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 556 p.
2. Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 876 p.
3. Овсяк В.Н., Курышев Г.Л., Сидоров Ю.Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. □ Новосибирск: Наука, 2001. – 376 с.
4. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С.А., Варавин В.С. и др. // ФТП. – 2001. – Т. 35. – №. 9. – С. 1092-1101.
5. Якушев М. В., Варавин В.С., Васильев В.В. и др. // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – №. 4. – С. 1-7.
6. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Коханенко А.П. и др. // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 2. – С. 35-39.
7. Voitsekhovskii A.V., Nsmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Thin Solid Films. – 2014. – V. 551. – P. 92-97.
8. Voitsekhovskii A.V., Nsmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Opto-Electronics Review. – 2014. – V. 22. – No. 4. – P. 236-244.
9. Voitsekhovskii A.V., Nsmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Russian Phys. J. – 2005. – V. 48. – No. 6. – P. 584-591.
10. Васильев В. В., Войцеховский А. В., Дульцев Ф. Н. и др. // Прикладная физика. – 2007. – № 5. – С. 63-66.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г.Томск, Россия

**Сибирский физико-технический институт ТГУ, г.Томск, Россия

***Институт физики полупроводников СО РАН, г.Новосибирск, Россия

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;
 Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
 Дзядух Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
 Сидоров Георгий Юрьевич, к.ф.-м.н., науч. сотр.;
 Варавин Василий Семенович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
 Дворецкий Сергей Алексеевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;
 Михайлов Николай Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
 Якушев Максим Витальевич, д.ф.-м.н., вед. науч. сотр.

A.V. VOITSEKHOVSKII, S.N. NESMELOV, S.M. DZYADUKH, G.Y. SIDOROV, V.S. VARAVIN, S.A. DVORETSKY,
 N.N. MIKHAILOV, M.V. YAKUSHEV

ADMITTANCE OF MIS STRUCTURES BASED ON THE GRADED-GAP $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ GROWN BY MOLECULAR-BEAM EPITAXY ON GAAS AND SI SUBSTRATES

The paper presents the results of research of the admittance of MIS structures based on $n(p)$ - HgCdTe , grown by molecular-beam epitaxy on various alternative substrates (GaAs and Si). The analysis of the main parameters of MIS structures based on $n(p)$ - HgCdTe at content of CdTe of 0.22 has been carried out.

Keywords: MIS structure, HgCdTe , molecular beam epitaxy, graded-gap layer, capacitance-voltage characteristic, alternative substrates

REFERENCES

1. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications, Chichester: John Wiley & Sons, 2011, 556 p.
2. Rogalski A. Infrared detectors: 2nd. ed., New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 876 p.
3. Ovsyuk V.N., Kuryshev G.L., Sidorov Yu.G., et al, Matrichnyue fotopriemnyue ustroystva infrakrasnogo diapozona, Novosibirsk: Nauka, 2001, 376 p. (In Russ.)
4. Sidorov Yu.G., Dvoretzkii S.A., Varavin V.S., et al. Molecular-Beam Epitaxy of Mercury–Cadmium–Telluride Solid Solutions on Alternative Substrates, *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 9, pp. 1045-1053.
5. Yakushev M. V., Varavin V. S., Vasil'ev V. V., et al., Infrared focal plane assemblies based on HgCdTe/Si (310) heterostructure, *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 148-150.
6. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Kokhanenko A.P., et al., Photoelectrical characteristics of mis structures on the basis of heteroepitaxial HgCdTe , *Russian Phys. J.*, 2005, vol. 48, no. 2, pp. 143-147.
7. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Photoelectrical characteristics of metal–insulator–semiconductor structures based on graded-gap HgCdTe grown by molecular-beam epitaxy, *Thin Solid Films*, 2014, vol. 551, pp. 92-97.
8. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Influence of composition of the near-surface graded-gap layer on the admittance of metal-insulator-semiconductor structures based on graded-gap MBE $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ in wide temperature range, *Opto-Electronics Review*, 2014, vol. 22, no. 4, pp. 236-244.
9. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., The influence of resistance of the epitaxial-film volume on the capacity-voltage characteristics of the HgCdTe/AOF and $\text{HgCdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ MIS structures, *Russian Phys. J.*, 2005, vol. 48, no. 6, pp. 584-591.
10. Vasil'ev V.V., Voitsekhovskii A.V., Dultsev F.N., et al., Plazmochimicheskoe osagdenie plenok dioxide i nitrída kremniya dlya passivatsii poverchnosti CRT, *Prikladnaya Fizika*, 2007, no. 5, pp. 62-67. (In Russ.)

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia,

**Siberian Physical-Technical Institute TSU, Tomsk, Russia,

***Institute Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Voitsekhovskii Alexander Vasilievich, Prof., Dr. Sc., Head of Chair;
 Nesmelov Sergey Nikolaievich, Senior Researcher, PhD;
 Dzyadukh Stanislav Mikhailovich, Senior Researcher, PhD.;
 Sidorov Georgy Yurievich, Researcher, PhD.;
 Varavin Vasily Semenovich, Senior Researcher, PhD.;
 Dvoretzkii Sergey Alexeevich, PhD., Head of Laboratory;
 Mikhailov Nikolay Nikolaievich, Senior Researcher, PhD.;
 Yakushev Maxim Vitalievich, Leading Researcher, Dr. Sc..