

УДК 621.315.592

*А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ¹, С.Н. НЕСМЕЛОВ¹, С.М. ДЗЯДУХ¹, Г.Ю. СИДОРОВ², В.С. ВАРАВИН²,
В.В. ВАСИЛЬЕВ², С.А. ДВОРЕЦКИЙ², Н.Н. МИХАЙЛОВ², М.В. ЯКУШЕВ²*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНОМ ГИСТЕРЕЗИСЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МЛЭ HgCdTe*

Использована специальная методика измерений электрофизических характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe, позволяющая исключить влияние гистерезисных явлений на результаты измерения первой производной емкости по напряжению. Предложены методы определения спектров поверхностных состояний в МДП-структурах на основе HgCdTe.

Ключевые слова: HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, гистерезис, вольт-фарадная характеристика, медленные состояния, граница раздела диэлектрик – полупроводник.

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ используется для создания высокочувствительных детекторов инфракрасного диапазона. Ширина запрещенной зоны $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ зависит от содержания CdTe (состава x), что позволяет оптимизировать детекторы для фотоприема в различных спектральных областях. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) HgCdTe позволяет выращивать гетероэпитаксиальные пленки с заданным распределением состава по толщине. В ИФП СО РАН выращивают пленки с приповерхностными варизонными слоями, что уменьшает влияние рекомбинации на поверхности на время жизни неосновных носителей заряда в объеме полупроводника и улучшает пороговые свойства детекторов.

Важной задачей при создании инфракрасных детекторов на основе HgCdTe является выбор оптимального пассивирующего покрытия. Для исследования свойств границы раздела, диэлектрика и приповерхностного слоя полупроводника часто используют измерения адмиттанса МДП-структур. Важными параметрами пассивирующего покрытия являются напряжение плоских зон, величина гистерезиса электрофизических характеристик, плотность поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик – полупроводник. В ИФП СО РАН разработаны технологии пассивации эпитаксиальных пленок при помощи низкотемпературного плазмохимического диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ и плазменного атомарного слоевого нанесения (PE ALD) Al_2O_3 [1]. Проблемой является большой гистерезис электрофизических характеристик МДП-структур на основе HgCdTe с приповерхностным варизонным слоем с повышенным содержанием CdTe. Гистерезис связан с обменом носителями заряда между HgCdTe и медленными состояниями переходного слоя между диэлектриком и полупроводником. Особенности гистерезиса вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур с двухслойным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ исследованы в работе [2]. Гистерезис ВФХ с диэлектриком PE ALD Al_2O_3 во многом сходен с гистерезисом для $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Гистерезис не позволяет однозначно определить напряжение плоских зон, поскольку оно зависит от направления изменения напряжения смещения (направления развертки напряжения). Также проблемой является определение плотности быстрых поверхностных состояний, поскольку наклон ВФХ в обеднении и слабой инверсии также зависит от направления развертки напряжения.

Целью данной работы является разработка методик определения спектров быстрых поверхностных состояний путем измерения электрофизических характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe с приповерхностным варизонным слоем с повышенным содержанием CdTe для случая большого гистерезиса инжекционного типа, характерного для пассивирующих покрытий PE ALD Al_2O_3 и $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$.

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.22$), выращенного методом МЛЭ на подложках из GaAs(013). При выращивании гетероструктуры с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe. В таблице приведены некоторые технологические и электрофизические параметры исследованных гетероструктур, определенные методами Холла и эллипсометрии.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области, проект р_а № 16-42-700759.

Параметры гетероструктур

№	Состав в рабочем слое	Состав на поверхности	Тип проводимости	Концентрация дырок, см ⁻³	Подвижность дырок, см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
1	0.22	0.47	<i>p</i>	6.0·10 ¹⁵	550
2	0.22	0.48	<i>p</i>	1.1·10 ¹⁶	480

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса нано-гетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки при измерениях принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным. Влияние сопротивления объема на измеряемые емкость и проводимость исключалось для всех измерений.

На рис. 1 показаны ВФХ МДП-структуры на основе *p*-Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te с варизонным слоем (структура №1). ВФХ измерялись по стандартной методике с постоянной скоростью развертки по напряжению. Из рис. 1 видно, что в обеднении емкостная зависимость более пологая при обратной развертке напряжения, а в инверсии зависимость более пологая при прямой развертке напряжения. Это хорошо видно из рис. 2, на котором показана зависимость производной емкости по напряжению от емкости при прямой и обратной развертке напряжения. Сходные зависимости рассматриваются в работе [2]. Для структуры № 2 результаты качественно совпадают с результатами для структуры № 1.

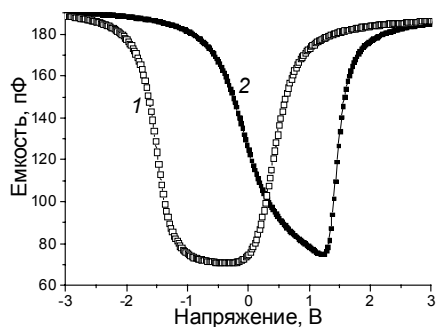


Рис. 1. ВФХ МДП-структуры на основе *p*-Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te с варизонным слоем (структура № 1), измеренные при 77 К при прямой (кр. 1) и обратной (кр. 2) развертке напряжения на частоте 10 кГц

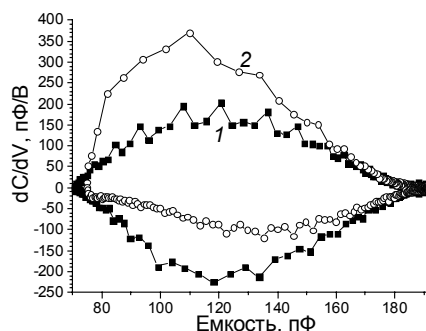


Рис. 2. Зависимости первой производной емкости по напряжению от емкости для МДП-структуры на основе *p*-Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te с варизонным слоем (структура № 1), измеренные при 77 К при прямой (кр. 1) и обратной (кр. 2) развертке напряжения на частоте 10 кГц

В [3] ранее был предложен метод оценки плотности состояний на границе раздела в МДП-структурах на основе InSb в условиях наличия значительного гистерезиса ВАХ. Авторы работы [3] использовали узкий диапазон напряжений смещения вокруг некоего центрального значения напряжения, что позволяло получить отрезок ВФХ, наклон которого не зависит от наличия медленных состояний в переходном слое [4] (и от направления развертки по напряжению). Данная методика ранее не применялась к МДП-структурам на основе HgCdTe.

В настоящей работе предпринята попытка применить методику из [3] для исключения влияния гистерезиса ВФХ в МДП-структурах на основе МЛЭ HgCdTe. Отличия модернизированной методики заключались в специальном алгоритме изменения напряжения смещения при измерениях ВФХ. При каждом шаге циклического алгоритма напряжение смещения изменялось с достаточно крупным шагом равным 0.5 В от отрицательных значений напряжения к положительным (прямая развертка) или от положительных значений к отрицательным (обратная развертка). Выставленное напряжение смещения становилось центральной точкой развертки. После этого в диапазоне напряжений (-0.1+0.1) В от центральной точки производилось измерение участка ВФХ с шагом 0.01 В непрерывно сначала в прямом, а затем в обратном и снова в прямом направлении.

В результате можно получить зависимость производной емкости от напряжения при прямой и обратной развертке напряжения.

На рис. 3 и 4 приведены ВФХ МДП-структуры на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с варизонным слоем (структура № 1), измеренные по методике со сложной формой развертки при 77 К при прямой и обратной развертке напряжения соответственно. Из рисунков видно, что при прямой развертке напряжения исключение гистерезиса приводит к более резкому изменению емкости в режиме инверсии. В режиме обеднения наклон ВАХ, измеренной по стандартной методике, близок к наклону, полученному при сложной развертке напряжения. При обратной развертке напряжения исключение гистерезиса приводит к более резкому наклону емкостной характеристики в режиме обеднения, а в режиме инверсии наклоны близки независимо от типа использованной развертки напряжения. Зная наклон ВФХ при исключении гистерезиса, можно построить зависимость производной емкости по напряжению от емкости. В отличие от кривых на рис. 2 при использовании сложной развертки построенные при прямой и обратной развертке напряжения зависимости достаточно близки друг к другу. Это позволяет рассчитать спектр поверхностных состояний в режиме обеднения и сильной инверсии по формуле [3]

$$N_{ss} = \frac{C_{дэ}}{q} \left(\frac{dC}{d\phi_s} \right)_{ideal} \left[\left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} - \left(\frac{dC}{dV} \right)_{ideal}^{-1} \right],$$

где q – заряд электрона; $C_{дэ}$ – емкость диэлектрика; ϕ_s – поверхностный потенциал; $\left(\frac{dC}{d\phi_s} \right)_{ideal}$ – производная теоретической (идеальной) емкости по поверхностному потенциалу; $\left(\frac{dC}{dV} \right)_{ideal}$ – производная теоретической (идеальной) емкости по напряжению смещения; $\left(\frac{dC}{dV} \right)$ – производная экспериментальной емкости по напряжению смещения, которая может быть получена при измерениях со сложной формой развертки.

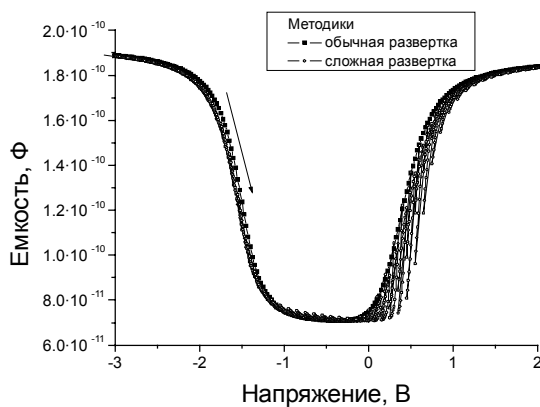


Рис. 3. ВФХ МДП-структуры на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с варизонным слоем (структура № 1), измеренные при 77 К на частоте 10 кГц при прямой развертке напряжения при обычной развертке напряжения и при сложной форме развертки

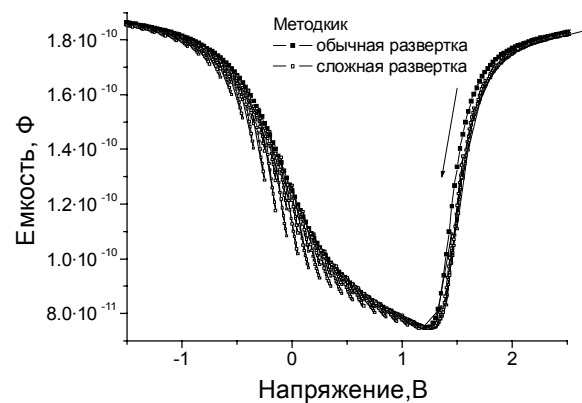


Рис. 4. ВФХ МДП-структуры на основе $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с варизонным слоем (структура № 1), измеренные при 77 К на частоте 10 кГц при обратной развертке напряжения при обычной развертке напряжения и при сложной форме развертки

Установлено, что наклон емкостной зависимости, полученной при сложной развертке, близок к наклону ВФХ, измеренной при обычной прямой развертке напряжения (для $p\text{-HgCdTe}$). Поэтому спектр поверхностных состояний можно определить для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ высокочастотным методом из ВФХ, измеренной при прямой развертке напряжения (и обратной развертке для случая $n\text{-HgCdTe}$). Различие наклонов емкостных характеристик при прямой и обратной развертке напряжения связано с тем, что захват подвижных носителей заряда на медленные

состояния и выброс носителей заряда с состояний в полупроводник происходят при различных напряжениях смещения [2].

Таким образом, предложены методики определения спектров поверхностных состояний путем измерения электрофизических характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe с приповерхностными варизонными слоями и значительным гистерезисом ВФХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fu R. and Pattison J. // Opt. Eng. – 2012. – V. 51. – No. 10. – P. 104003-1–1004003-4.
2. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 97–106.
3. Nakagawa T. and Fujisada H. // Appl. Phys. Lett. – 1977. – V. 31. – No. 5. – P. 348–350.
4. Nakagawa T. and Fujisada H. // IEE Proc. I (Solid-State and Electron Devices). – 1984. – V. 131. – No. 2. – P. 51–55.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 12.10.17.

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: vav43@mail.tsu.ru;
Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: nesm69@mail.ru;
Дзядух Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: bonespirit@mail2000.ru;
Сидоров Георгий Юрьевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией, e-mail: sidorov_gy@isp.nsc.ru;
Варавин Василий Семенович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: varavin@isp.nsc.ru;
Васильев Владимир Васильевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией, e-mail: vasiliev_vv@isp.nsc.ru;
Дворецкий Сергей Алексеевич, к.ф.-м.н., зав. отделом, e-mail: dvor@isp.nsc.ru;
Михайлов Николай Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: mikhailov@isp.nsc.ru;
Якушев Максим Витальевич, д.ф.-м.н., зав. лабораторией, e-mail: yakushev@isp.nsc.ru.

A.V. VOITSEKHOVSKII¹, S.N. NESMELOV¹, S.M. DZYADUKH¹, G. Yu. SIDOROV², V.S. VARAVIN², V.V. VASIL'EV²,
S.A. DVORETSKII², N.N. MIKHAILOV², M.V. YAKUSHEV²

DETERMINATION OF THE SURFACE STATES SPECTRA FROM ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH A SIGNIFICANT HYSTERESIS FOR MIS STRUCTURES BASED ON MBE HgCdTe

A special technique for measuring the electrophysical characteristics of MIS structures based on MBE HgCdTe is used to exclude the influence of hysteresis phenomena on the results of measuring the first voltage derivative of a capacitance. Methods for determining the spectra of surface states in MIS structures based on HgCdTe are proposed.

Keywords: HgCdTe, molecular beam epitaxy, hysteresis, capacitance-voltage characteristic, slow states, insulator-semiconductor interface.

REFERENCES

1. Fu R. and Pattison J. Advanced thin conformal Al₂O₃ films for high aspect ratio mercury cadmium telluride sensors. *Optical Engineering*, 2012, vol. 51, no. 10, pp. 104003-1–1004003-4.
2. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., and Dzyadukh S.M. Hysteresis Phenomena in mis Structures Based on Graded-Gap MBE HgCdTe with a Two-Layer Plasma-Chemical Insulator SiO₂/Si₃N₄. *Izv. vuzov. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 97–106. [In Russ.]

3. Nakagawa T. and Fujisada H. Method of separating hysteresis effects from MIS capacitance measurements. *Applied Physics Letters*, 1977, vol. 31, no. 5, pp. 348–350.
4. Nakagawa T. and Fujisada H. Method for evaluation of hysteretic interface properties and their application to anodised InSb MIS diodes. *IEE Proceeding I (Solid-State and Electron Devices)*, 1984, vol. 131, no. 2, pp. 51–55.

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Voitsekhovskii Alexander Vasilievich, Dr.Sc., Professor, e-mail: vav43@mail.tsu.ru;

Nesmelov Sergey Nikolaevich, Ph.D., Senior Researcher, e-mail: nesm69@mail.ru;

Dzyadukh Stanislav Mikhailovich, Ph.D., Senior Researcher, e-mail: bonespirit@mail2000.ru;

Sidorov Georgy Yurievich, Ph.D., Head of Laboratory, e-mail: sidorov_gy@isp.nsc.ru;

Varavin Vasily Semenovich, Ph.D., Senior Researcher, e-mail: varavin@isp.nsc.ru;

Vasil'ev Vladimir Vasilievich, Ph.D., Head of Laboratory, e-mail: vasiliev_vv@isp.nsc.ru;

Dvoretskii Sergey Alexeevich, Ph.D., Head of Department, e-mail: dvor@isp.nsc.ru;

Mikhailov Nikolay Nikolaevich, Ph.D., Senior Researcher, e-mail: mikhailov@isp.nsc.ru;

Yakushev Maxim Vitalievich, Dr.Sc., Head of Laboratory, e-mail: yakushev@isp.nsc.ru.