

УДК 621.315.592

В.Г. СРЕДИН*, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ**, О.Б. АНАНЬИН***, А.П. МЕЛЕХОВ***,
С.Н. НЕСМЕЛОВ**, С.М. ДЗЯДУХ**

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Cd_xHg_{1-x}Te$ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Исследованы электрофизические характеристики МДП-структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ до и после воздействия рентгеновским излучением с энергией квантов в диапазоне $E = 0,5 \div 12$ кэВ. Показано, что воздействие рентгеновского излучения приводит к увеличению концентрации основных носителей заряда, а также появлению уровней поверхностных состояний с высокой плотностью.

Ключевые слова: мягкое рентгеновское излучение, теллурид кадмия ртути, МДП структура, поверхностные уровни, адмиттанс

Ранее было показано, что мягкое рентгеновское излучение (МРИ) приводит к изменению морфологии поверхности монокристаллов и эпитаксиальных слоев твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ [1,2], при этом не было обнаружено существенных изменений ни концентрации носителей, ни подвижности носителей заряда как в объеме материала, так и в приповерхностной области. При этом можно было ожидать, что увеличение степени дефектности поверхности должно было бы приводить к изменению ее гальваномагнитных характеристик.

К МРИ относят диапазон с длинами волн от 0.3 до 30 нм ($4 - 0.4$ кэВ). В [1,2] использовалось рентгеновское излучение (РИ) лазерной плазмы, у которой свыше 80% энергии приходится на область 50-250 эВ. В настоящей работе использовалось РИ, возникающее при генерации плазмы лазерно-индуцированной вакуумной искры с энергией квантов в диапазоне $E = 0,5 \div 12$ кэВ [3], которому принадлежат уровни энергии внутренних электронных оболочек атомов. Для отсечки низкоэнергетического РИ и корпускулярных потоков нами применялся майларовый фильтр с напыленным слоем меди толщиной $h = (3 \pm 0,6)$ мкм (рис.1), который размещался на расстоянии $l = 30$ мм от источника.

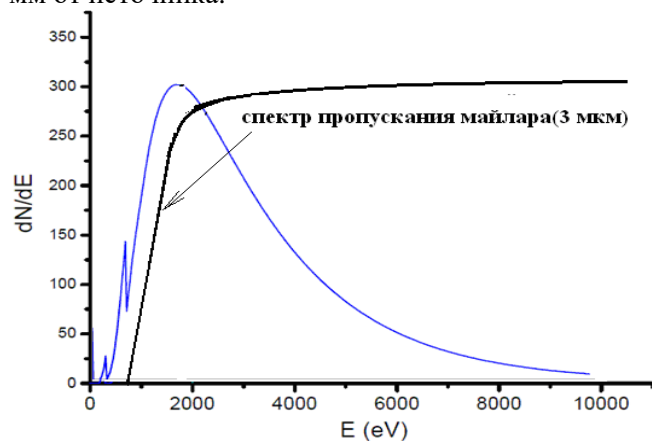


Рис.1. Спектральное распределение РИ лазерно-индуцированной разрядной плазмы и спектр пропускания майларового фильтра

Исследуемые образцы представляли собой эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ с составом $x \approx 0.22$ толщиной порядка 10 мкм, выращенные на монокристаллической подложке CdTe. Слои имели дырочный тип проводимости. Количественная оценка поглощенной дозы РИ образцами была получена в предположении о том, что лазерно-индуцированная разрядная плазма является точечным источником РИ, и составляла от 0.15 до 15 Дж/см² в зависимости от времени экспозиции.

На облученных образцах по методике, предложенной в [4], были созданы МДП структуры, на которых были проведены исследования их электрофизических характеристик. Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A (температурный диапазон 8-475 К, разрешение по емкости и нормированной на частоту проводимости до 1 фФ, диапазон выставляемого напряжения $-40/+40$ В, частоты – 20 Гц – 2 МГц). Установка позволяла проводить измерения емкости и проводимости МДП-структур в зависимости от напряжения смещения, частоты тестового сигнала и температуры. При измерении полевых зависимостей емкости и проводимости за прямое направление развертки принимается изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развертки –

от положительных к отрицательным. При обработке результатов измерений предпринимались меры для исключения влияния сопротивления объема эпитаксиального слоя [5] по методике, предложенной [6].

Как показали наши исследования, на температурных зависимостях вольт-фарадных характеристик (ВФХ) после воздействия МРИ в режиме обеднения возникает особенность в виде «полочки», связанная с влиянием перезарядки поверхностных состояний при изменении напряжения смещения на зависимость поверхностного потенциала от напряжения.

На рис.2 представлены зависимости $1/C^2$ от напряжения смещения, где C — удельная емкость МДП-структуры в Ф/м^2 в режиме обеднения. Из рис.2 следует, что $1/C^2$ зависимость представляет собой прямую при малой плотности поверхностных состояний и равномерном распределении концентрации основных носителей заряда по толщине в пределах области пространственного заряда. Из наклона этой прямой можно найти интегральную концентрацию основных носителей заряда [7].

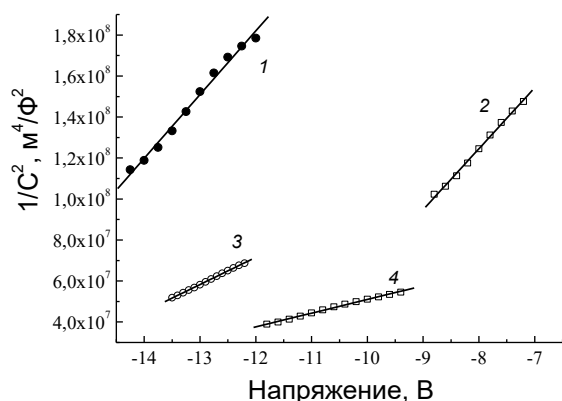


Рис.2. Зависимости $1/C^2$ в режиме обеднения от напряжения смещения для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ для исходных структур (кр. 1 и 2) и после воздействия МРИ (кр. 3 и 4), построенные по данным измерения ВФХ при температуре 77 К на частоте 50 кГц при прямой развертке напряжения

Для одного из образцов после воздействия МРИ проявляется максимум поверхностных состояний при энергиях $E_v+(0.37-0.45)$ эВ (или $E_c-(0.065-0.145)$ эВ) со средней плотностью состояний в этом энергетическом диапазоне $1.63 \cdot 10^{12}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. В другой точке образца после воздействия проявляется максимум поверхностных состояний при энергиях $E_v+(0.34-0.39)$ эВ (или $E_c-(0.125-0.175)$ эВ) со средней плотностью поверхностных состояний в этом диапазоне энергий $7.40 \cdot 10^{12}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (здесь E_v и E_c — вершина валентной зоны и дно зоны проводимости, соответственно).

Таким образом впервые показано, что МРИ создает поверхностные энергетические уровни на поверхности эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Отметим, что наши исследования были выполнены на образцах без учета кристаллографической ориентации их поверхности, хотя ранее было установлено [8,9], что для этих твердых растворов такая зависимость существует. Поэтому можно ожидать, что результаты воздействия РИ на них могут зависеть и от этого фактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Среди́н В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д. и др. // Изв. вузов. Физика. — 2013. — № 9/2. — С. 113-115.
2. Среди́н В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д. и др. // Прикладная физика. — 2013. — № 6. — С. 17-20.
3. Додулад Э.И., Влияние конфигурации электродов на эмиссионные свойства разряда типа НВИ: Автореферат дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2013.
4. Васильев В. В., Войцеховский А. В., Дульцев Ф. Н. и др. // Прикладная физика. — 2007. — № 5. — С. 63-66.

Обработка результатов измерений, представленных на рис.2 с учетом указанных выше предположений, показала, что концентрации дырок в приповерхностном слое для исходных МДП-структур составляет $2.62 \cdot 10^{15}$ см^{-3} и $2.74 \cdot 10^{15}$ см^{-3} , а для МДП-структур после воздействия МРИ — $6.14 \cdot 10^{15}$ см^{-3} и $1.21 \cdot 10^{16}$ см^{-3} , соответственно. Таким образом, концентрация основных носителей в приповерхностном слое полупроводника после воздействия МРИ возрастает в 2-4 раза. Зависимость $1/C^2$ от напряжения смещения хорошо аппроксимировалась прямой, что свидетельствует о том, что завышение концентрации из-за поверхностных состояний в данном случае маловероятно.

Дальнейший анализ ВФХ показывает, что в исходных образцах наблюдается низкая плотность поверхностных состояний, в то время как после облучения их плотность заметно увеличивается.

5. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – №6. – С.31-37.
6. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – №10. – С.3-18.
7. Колешко В.М. C-V методы измерения параметров МОП-структур // Обзоры по электронной технике. – 1977. – Вып. 2(465). – 82 с.
8. Среди́н В.Г., Мезин Ю.С., Укроженко В.М. // ФТП. – 2001. – т. 35. – № 11. – С. 1335 – 1337.
9. Среди́н В.Г., Ланская О. Г., Поповнин В. М. // ФТП. – 1996. – т. 30. – № 3. – С. 385-387

* Военная Академия РВСН им. Петра Великого, г Москва, Россия

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

*** Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, Россия

E-mail: sredinvg@rambler.ru

Среди́н Виктор Геннадиевич, д.ф.-м.н., профессор;
 Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор;
 Ананин Олег Борисович, д.ф.-м.н., профессор;
 Мелехов Андрей Петрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
 Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;
 Дзядух Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

V.G. SREDIN, A.V. VOITSEKHOVSKII, O.B. ANAN'IN, A.P. MELEKHOV,
 S.N. NESMELOV, S.M. DZYADUKH

SURFACE MODIFICATION OF SOLID SOLUTIONS $CD_xHG_{1-x}TE$ BY X-RAY RADIATION

The electrical characteristics of MIS structures based on $Cd_xHg_{1-x}Te$ before and after exposure to X-rays with photon energies in the range $E = 0,5 \div 12$ keV have been investigated. It is shown that exposure to X-ray radiation increases the concentration of the majority charge carriers, as well as the appearance of the levels of surface states with high density.

Keywords: soft X-ray radiation, mercury cadmium telluride, MIS structure, surface states, admittance

REFERENCES

1. Sredin V.G., Ananiin O.B., Burlacov I.D. et al. Investigation of Influence of soft X-ray on the surface properties of $Cd_xHg_{1-x}Te$ solid solutions. Izvestia vuzov. Physics. 2013, no. 9/2, pp. 113-115.
2. Sredin V.G., Ananiin O.B., Burlacov I.D. et al. Influence of soft X-ray on the surface properties for $Cd_xHg_{1-x}Te$ solid solutions. Appl. Phys. (Rus.). 2013, no.6, pp. 17 – 20.
3. Dodulad E.I. Influence of electrode configuration on emission properties of discharge. PhD Thesis, MEPhI, Moscow, 2013.
4. Vasilyev V.V., Voitsekhovskiy A.V., Dultsev F.N. et al. PECVD silicon dioxide and silicon nitride for MCT surface passivation. Appl. Phys. (Rus.). 2007, no. 5, pp. 63-66.
5. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. The influence of resistance of bulk of epitaxial films on capacitance-voltage characteristics of MIS-structures $Cd_xHg_{1-x}Te/AOF$ and $Cd_xHg_{1-x}Te/SiO_2/Si_3N_4$. Izvestia vuzov. Physics. 2005, no.6, pp.31-37.
6. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. Investigation into MIS structures based on graded-gap heteroepitaxial $Cd_xHg_{1-x}Te$ grown by molecular-beam epitaxy using photo-EFM and conductivity methods. Izvestia vuzov. Physics. 2009, no. 10, pp. 3-18.
7. Koleshko V.M. C-V- methods of measurements of MIS-structure parameters. Reviews of consumer electronics. 1977, no.2 (465), 82p.
8. Sredin V.G., Uкроженко V.M., Mezin Yu.S. Effect of surface orientation of $Cd_xHg_{1-x}Te$ crystals on the properties of surface anodic oxides. Semiconductors. 2001.vol. 35, no 11, pp.1279-1281.
9. Sredin V.G., Lanskaya O.G., Popovnin V.M. Orientation dependence of anodic surface oxides on $Cd_xHg_{1-x}Te$. Semiconductors. 1996, vol.30, no.3, pp. 215-216.

*Peter the Grate Military Academy of the RVSН, Moscow, Russia,

**National Research Tomsk State University, Tomsk. Russia,

***MEPhI National Research Nuclear University, Moscow, Russia

Sredin Victor Gennadievich, Prof., Dr. Sc. ;
 Voitsekhovskii Aleksandr Vasilievich, Prof., Dr. Sc. ;
 Ananiin Oleg Borisovich, Prof., Dr. Sc. ;
 Melekhov Andrei Petrovich, Researcher, PhD;
 Nesmllov Sergei Nicolaevich, Researcher, PhD;