

Воздействие оптического излучения на адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с приповерхностными варизонными слоями

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

Проведены исследования влияния оптического излучения на адмиттанс МДП-структур на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием CdTe и без таких слоев. Установлено, что освещение существенно изменяет вид полевых зависимостей емкости и приведенной проводимости в режиме инверсии для структуры с варизонным слоем. Изменение емкости МДП-структуры в режиме инверсии происходит по двум механизмам: уменьшение времени формирования инверсионного слоя, увеличение значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ. Приведенная проводимость МДП-структуры при освещении уменьшается на низких частотах, но возрастает на высоких частотах.

Ключевые слова: МДП-структуры, HgCdTe , молекулярно-лучевая эпитаксия, адмиттанс, варизонный слой.

Ссылка: Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сидоров Ю. Г. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 46.

Reference: A. V. Voitsekhovskii, N. A. Kulchitsky, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, M. V. Yakushev, and G. Yu. Sidorov, Prikl. Fiz., No. 1, 46 (2019).

Введение

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (HgCdTe), выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), пер-

спективен для разработки новых типов приборов оптоэлектроники и нанофотоники [1]. Интерес к МДП-структурам на основе HgCdTe связан с возможностями создания монолитных инфракрасных сенсоров, а также с необходимостью пассивации поверхности разрабатываемых приборов. Для исследования характеристик МДП-структур часто используют измерения адмиттанса в различных условиях. Дополнительную информацию могут дать измерения адмиттанса при воздействии оптического излучения [2–4]. Влияние освещения на адмиттанс МДП-структур на основе варизонного HgCdTe в широком диапазоне температур пока не изучено, хотя такие исследования могут дать дополнительную информацию о физических процессах в варизонных структурах.

Целью данной работы являются исследования влияния оптического излучения на адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с приповерхностными варизонными слоями и без таких слоев.

Образцы и методики эксперимента

МДП-структуры изготавливались на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$, выращенного в ИФП СО РАН методом МЛЭ на подложках из $\text{Si}(013)$. В процессе

Войцеховский Александр Васильевич¹, зав. каф., д.ф.-м.н., профессор.

Кульчицкий Николай Александрович², гл. спец., д.т.н.

Несмелов Сергей Николаевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дзядух Станислав Михайлович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Варавин Василий Семенович³, с.н.с., к.ф.-м.н.

Дворецкий Сергей Алексеевич^{1,3}, зав. отделом, к.ф.-м.н.

Михайлов Николай Николаевич³, с.н.с., к.ф.-м.н.

Якушев Максим Витальевич³, зав. лаб., д.ф.-м.н.

Сидоров Георгий Юрьевич³, зав. лаб., к.ф.-м.н.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет.

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

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

² АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

³ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2018 г.

выращивания гетероэпитаксиальных пленок с обеих сторон рабочего слоя формировались варизонные слои с повышенным содержанием CdTe. Содержание CdTe в верхнем варизонном слое вблизи поверхности полупроводника достигало 0,477, а толщина этого слоя была близка к 0,5 мкм. Перед нанесением диэлектрического покрытия концентрация и подвижность электронов, а также проводимость определялись из холловских измерений при температуре 78 К. Интегральная концентрация электронов в эпитаксиальной пленке составляла $5,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а подвижность электронов $34000 \text{ см}^2/(\text{В с})$.

Исследовались МДП-структуры на основе системы $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с приповерхностным варизонным слоем с повышенным содержанием CdTe (структура № 1) и без такого слоя (структура № 2). Для структуры № 2 приповерхностный варизонный слой удалялся путем травления в растворе $\text{Br}_2\text{-HBr}$, а затем диэлектрический слой Al_2O_3 формировался при помощи плазменного атомно-слоевого нанесения [5]. Для структуры № 1 диэлектрическое покрытие наносилось сверху варизонного слоя. Изучение таких образцов позволяет исследовать влияние варизонного слоя на свойства МДП-структур.

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки принимается изменение напряжения от отрицательных значения к положительным, а за обратное – от положительных к отрицательным. Исследования электрофизических свойств проводились в темновом режиме, а также при освещении структуры через подложку излучением с длиной волны 0,91 мкм.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и зависимости приведенной проводимости от напряжения для МДП-структуры № 1 с варизонным слоем, измеренные при различных частотах и температурах в темноте и при освещении. Из рис. 1 видно, что освещение существенно изменяет вид полевых зависимостей емкости и приведенной проводимости в режиме инверсии, а в режиме обогащения и обеднения изменения зависимостей практически отсутствуют. На рис. 2 показаны ВФХ и зависимости приведенной проводимости от напряжения для МДП-структуры № 2 без варизонного слоя, измеренные при различных частотах и температурах в темноте и при освещении.

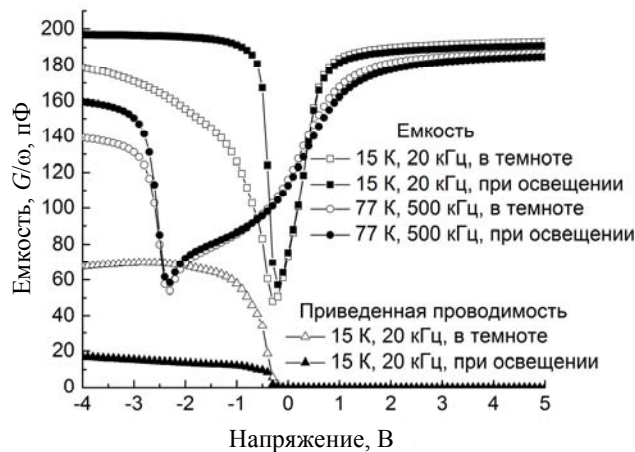


Рис. 1. Зависимости емкости и приведенной проводимости структуры № 1 с варизонным слоем, измеренные при различных частотах и температурах в темноте и при освещении.

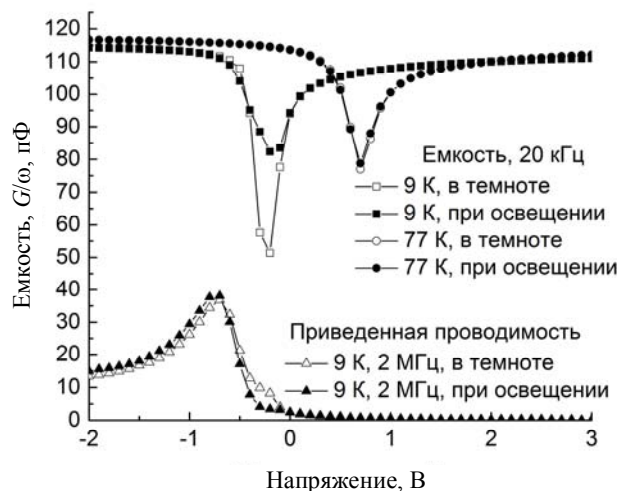


Рис. 2. Зависимости емкости и приведенной проводимости структуры № 2 без варизонного слоя, измеренные при различных частотах и температурах в темноте и при освещении.

Изменения емкости МДП-структуры в режиме инверсии определяется двумя механизмами: уменьшением постоянной времени формирования инверсионного слоя и увеличением значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ. Приведенная проводимость для структуры № 1 с варизонным слоем на частоте 20 кГц при освещении уменьшается. Для структуры № 2 без варизонного слоя влияние освещения на емкость и проводимость менее заметно из-за низкочастотного вида ВФХ в темновом режиме. Заметно увеличение при освещении емкости в минимуме ВФХ при 9 К, приведенная проводимость на частоте 2 МГц при освещении несколько уменьшается.

Исследовано влияние освещения на зависимости значений элементов эквивалентной схемы (дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) $R_{\text{ОПЗ}}$, емкости

ОПЗ $C_{\text{ОПЗ}}$ и емкости инверсионного слоя C_p) от напряжения смещения и температуры для структуры № 1 с варизонным слоем. Используемые эквивалентные схемы МДП-структур приведены в [6], а метод расчета элементов эквивалентной схемы из измерений адмиттанса описан в [7, 8]. На рис. 3 приведены значения $R_{\text{ОПЗ}}$, $C_{\text{ОПЗ}}$ и C_p , определенные данным методом при температуре 15 К и различных напряжениях в режиме инверсии для структуры № 1 в темноте и при освещении. Из рис. 3 видно, что освещение приводит к некоторому увеличению емкости инверсионного слоя C_p и к более заметному уменьшению дифференциального сопротивления ОПЗ $R_{\text{ОПЗ}}$. Причиной

уменьшения $R_{\text{ОПЗ}}$ является увеличение генерационного потока неосновных носителей за счет фотогенерации. При освещении $C_{\text{ОПЗ}}$ увеличивается, что связано с уменьшением поверхностного потенциала и уменьшении максимальной ширины ОПЗ за счет появления дополнительных неосновных носителей заряда в инверсионном слое, возникших в результате фотогенерации.

На рис. 4 показаны зависимости $R_{\text{ОПЗ}}$ и времени формирования инверсионного слоя ($\tau = R_{\text{ОПЗ}} \times C_p$) для структуры № 1 в темноте и при освещении. Из рис. 4 видно, что время формирования инверсионного слоя уменьшается при освещении в широком диапазоне температур.

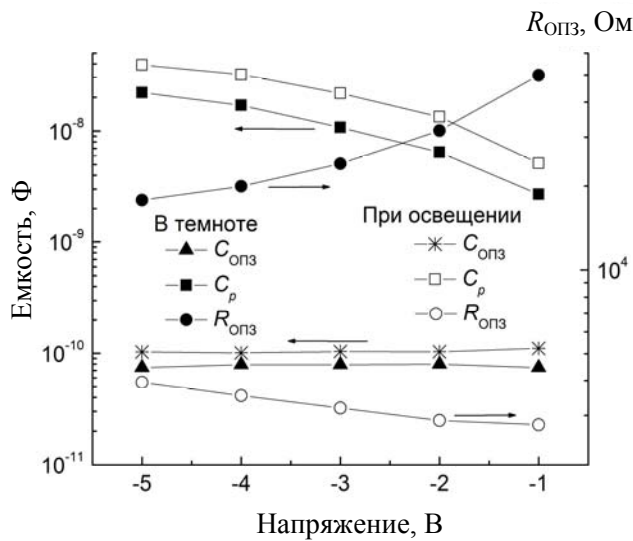


Рис. 3. Зависимости значений C_p , $R_{\text{ОПЗ}}$ и $C_{\text{ОПЗ}}$ для структуры № 1 с варизонным слоем, измеренные при температуре 15 К на частотах 20–50 кГц в темноте и при освещении.

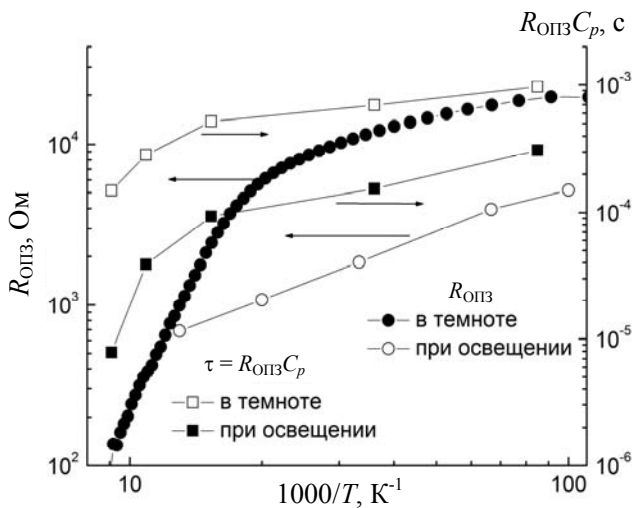


Рис. 4. Зависимости $R_{\text{ОПЗ}}$ а также времени формирования инверсионного слоя от обратной температуры для структуры № 1 с варизонным слоем в темноте и при освещении.

Проведено численное моделирование низкочастотных и высокочастотных ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ в темноте и при различных интенсивностях освещения. Показано, что для структур без варизонного слоя при освещении уменьшается поверхностный потенци-

ал, что сопровождается увеличением высокочастотной емкости в режиме сильной инверсии или емкости в минимуме низкочастотной ВФХ. Для структур с варизонным слоем при малых интенсивностях излучения происходит уменьшение поверхностного потенциала, но отсутствуют измене-

ния в емкостных характеристиках. Этот эффект возникает, когда при освещении возрастает концентрация носителей заряда в инверсионном слое, но не уменьшается максимальная ширина ОПЗ. Уменьшение при освещении приведенной проводимости МДП-структуры на низких частотах (и рост на высоких частотах) можно объяснить в рамках представлений, развитых в [2].

Заключение

Таким образом, установлено, что освещение существенно изменяет вид полевых зависимостей емкости и приведенной проводимости в режиме инверсии для структуры с варизонным слоем. Изменение емкости МДП-структуры в режиме инверсии происходит по двум механизмам: уменьшение времени формирования инверсионного слоя, увеличение значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ. Приведенная проводимость МДП-структуры при освещении уменьшается на низких частотах, но возрастает на высоких частотах. Влияние освещения на адмиттанс МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ не проявляется в обеднении и обогащении. Под действием освещения дифференциальное сопротивление ОПЗ уменьшается при температуре 15 К почти в 4,5 раза, а инверсионная емкость возрастает менее чем в 2 раза, что приводит к уменьшению времени формирования инверсионного слоя в широком диапазоне условий. Увеличение емкости ОПЗ при

освещении связано с уменьшением максимальной ширины ОПЗ из-за увеличения концентрации носителей в инверсионном слое. Для структур с варизонным слоем и без варизонного слоя при освещении с малой интенсивностью излучения происходит уменьшение поверхностного потенциала, но для структур с варизонным слоем отсутствуют изменения в емкостных характеристиках.

Исследование выполнено

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
2. Grosvalet J., Jund C. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1967. Vol. 14. No. 11. P. 777.
3. Sachenko A. V., Zuev V. A., Litovchenko V. G., Peikov P. C. // Physica Status Solidi (a). 1974. Vol. 21. No. 1. P. 345.
4. Chandra M. M., Suryan G. // Solid-State Electronics. 1983. Vol. 26. No. 8. P. 731.
5. Fu R., Pattison J. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003.
6. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Opto-Electronics Review. 2014. Vol. 22. No. 4. P. 236.
7. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Journal of Electronic Materials. 2016. Vol. 45. No. 2. P. 881.
8. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Russian Physics Journal. 2016. Vol. 59. No. 7. P. 920.

PACS: 85.60 Gz

The effect of optical radiation on the admittance of MIS structures based on MBE $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ with near-surface graded-gap layers

*A. V. Voitsekhovskii¹, N. A. Kulchitsky², S. N. Nesmelov¹, S. M. Dzyadukh¹, V. S. Varavin³,
S. A. Dvoretzky^{1,3}, N. N. Mikhailov³, M. V. Yakushev³, and G. Yu. Sidorov³*

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

² Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

³ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS
13 Lavrentieva pr., Novosibirsk, 630090, Russia,
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Received May 29, 2018

It is established that illumination significantly changes the form of the voltage dependences of capacitance and normalized conductance in the inversion mode for a structure with a graded-gap layer. The change in the capacitance of the MIS structure in the inversion mode occurs by two mechanisms: a decrease in the formation time of the inversion layer, an increase in the capacitance at the minimum of the low-frequency capacitance-voltage characteristic. The normalized conductance of the MIS structures under illumination decreases at low frequencies, but increases at high frequencies. The influence of illumination on the admittance of n-Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te MIS structures is not manifested in depletion and accumulation modes. Under the influence of illumination, the differential resistance of the space-charge region (SCR) decreases almost at 4.5 times at 15 K, and the inversion capacitance increases by less than 2 times, which leads to a decrease in the formation time of the inversion layer. The increase in the capacitance of the SCR under illumination is associated with a decrease in the maximum width of the SCR due to an increase in carrier concentration in the inversion layer. For structures with a graded-gap layer and without a graded-gap layer under illumination with a low radiation intensity, the surface potential decreases, but for structures with a graded-gap layer, there are no changes in the capacitive characteristics.

Keywords: MIS structure, HgCdTe, molecular beam epitaxy, admittance, graded-gap layer.

REFERENCES

1. P. Capper and J. Garland, *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications*. (Chichester: John Wiley & Sons, 2011).
2. J. Grosvalet and C. Jund, *IEEE Trans. Electron Dev.* **14** (11), 777 (1967).
3. A. V. Sachenko, V. A. Zuev, V. G. Litovchenko, and P. C. Peikov, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **21** (1), 345 (1974).
4. M. M. Chandra and G. Suryan, *Solid-State Electron.* **26** (8), 731 (1983).
5. R. Fu and J. Pattison, *Opt. Engin.* **51** (10), 104003 (2012).
6. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Opto-Electron. Rev.* **22** (4), 236 (2014).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *J. Electron. Mater.* **45** (2), 881 (2016).
8. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Russ. Phys. J.* **59** (7), 920 (2016).