Ультразвуковое воздействие на генерационно-рекомбинационные свойства межфазной границы МДП структур

Б.Х. Кучкаров[*1], О.О. Маматкаримов[2]

[1] Наманганский государственный университет, ул. Уйчи, 316, 160119, Наманган, Узбекистан
[2] Наманганский инженерно-технологический институт, улица Касансай, №7, 160115, Наманган, Узбекистан

Получена 10.10.2019

*Corresponding author: e-mail bxquchqar@mail.ru

Исследовано влияние ультразвукового воздействия на плотность электронных состояний, локализованных на межфазной границе раздела Si-стекло. Предложена методика определения величин скоростей поверхностной и объемной генерации носителей заряда, используя расчётную временную зависимость ширины области пространственного заряда (ОПЗ) при сравнении её с экспериментальной зависимостью. Ультразвуковая обработка структур Al-*n*-Si-стекло-Al частотой 2.5 мГц, мощностью 0.5 Вт в течение 40 минут приводит к уменьшению скорости формирования заряда инверсионного слоя. Это обусловлено уменьшением интегральной плотности электронных состояний, локализованных на межфазной границе полупроводник-стекло и не влияет на энергетический спектр объемных электронных состояний в полупроводнике.

Ключевые слова ультразвуковое облучение, C-V характеристики, локализованные состояния, релаксация, генерация носителей, диэлектрические потери, межфазные границы, изотермическая релаксация емкости.

The effect of ultrasonic action on the density of electronic states localized at the Si-glass interface is studied. A method is proposed for determining the surface and volume generation rates of charge carriers using the calculated time dependence of the space charge region width (SCR) when comparing it with the experimental dependence. Ultrasonic treatment of Al-*n*-Si-glass-Al structures with a frequency of 2.5 MHz and a power of 0.5 W for 40 min leads to a decrease in the rate of charge formation of the inversion layer. This is due to a decrease in the integral density of electronic states localized at the semiconductor-glass interface, and does not affect the energy spectrum of bulk electronic states in a semiconductor.

Keywords: ultrasonic irradiation, C-V characteristics, localized states, relaxation, carrier generation, dielectric losses, interphase boundaries, isothermal relaxation of capacitance.

I. Введение

Структуры типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе кремния в настоящее время являются основой широкого класса полупроводниковых приборов и структурных элементов интегральных схем. При этом характеристики границы раздела полупроводник-диэлектрик могут оказывать существенное влияние на параметры изготавливаемых приборов и структурных элементов [1, 2]. Исследованиям влияния на параметры границ раздела таких воздействий, как термическая обработка и γ-облучение, посвящено достаточно много работ [3-6]. Что касается влияния ультразвуковых воздействий, то имеющиеся данные недостаточно широко интерпретированы. Так, в работе [7] показано, что ультразвуковое воздействие может привести как к уменьшению, так и к увеличению заряда, локализованного на

межфазных границах раздела SiO_2-*p*-Si. В работе [8] показано, что ультразвуковое облучение приводит к перестройке напряженных валентных связей на межфазной границе раздела полупроводник-стекло с одновременным увеличением сечения захвата локализованных на них электронов.

Целью настоящей работы является исследование влияния ультразвукового воздействия на плотность электронных состояний, локализованных на межфазной границе раздела Si-стекло.

II. Исследуемые образцы

Тестовые структуры изготавливали путём нанесения стекла на подложку Si *n*-типа проводимости с кристаллографической ориентацией <100>. Нанесение стекла осуществляли с помощью электрофореза из суспензии, содержащей мелкодисперсную шихту стекла (SiO_2-PbO-B_2O_3-Al_2O_3-Ta_2O_5) и изопропилиновый спирт, с последующим оплавлением при температуре 670–680°C и отжигом в бескислородной атмосфере. Толщина полученных слоёв стекла составила $d = (2\pm0.2)\times 10^{-4}$ см. Массовое содержание входящих в стекло оксидов составило SiO_2 – 30%; PbO – 50%; B_2O_3 – 15%. Также исследуемые стёкла содержали оксиды алюминия и тантала с массовыми долями 5% и оксиды щелочных металлов Ka_2O и Na_2O, массовые доли которых не превышали 0.01%.

МДП структуры изготавливали вакуумным осаждением алюминия на поверхность слоя стекла. Диаметр управляющих электродов равен 3 мм. Изготовленные структуры подвергали облучению продольными ультразвуковыми волнами частотой 2.5 мГц и мощностью 0.5 Вт в течение 40 минут, т.е. использовали воздействие, аналогичное описанному в [9]. Звукопроводом между пьезопреобразователем и исследуемой структурой являлась жидкость.

III. Метод исследования

В качестве основного метода исследования мы использовали метод изотермической релаксации емкости структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) в процессе увеличения заряда инверсионного слоя [9-10]. В соответствии с общепринятой моделью структуры МДП, временная зависимость емкости этой структуры, после импульсного увеличения прикладываемого напряжения, (без учета влияния формирующегося заряда инверсионного слоя) может быть выражена при помощи следующего соотношения:

$$C(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 K C_d}{K + x(t)C_d}. \qquad (1)$$

Здесь K – площадь управляющего электрода, C_d – емкость слоя диэлектрика, ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, ε_0 – электрическая постоянная, $x(t)$ – временная зависимость ширины области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника. Величина C_d определяется по высокочастотной вольт-фарадной характеристике с помощью метода, описанного в работе [11]. Значения $C(t)$ можно найти для каждого момента времени t из экспериментальной релаксационной характеристики структуры МДП, используя выражение (7) указанной работы:

$$x = \left(x_0 + \frac{S}{A}\right)\exp\left(-\frac{A}{N}t\right) - \frac{S}{A}. \qquad (2)$$

Здесь x – толщина слоя объёмного заряда полупроводника структуры МДП, x_0 – начальная толщина этого слоя, A – скорость генерации носителей заряда в объеме полупроводника, N – концентрация легирующей примеси. Полученную расчетную временную зависимость ширины ОПЗ, изменяющуюся в процессе формирования заряда инверционного слоя, можно использовать для определения величин скорости поверхностной и объемной генерации носителей заряда при сравнении с экспериментальной зависимостью.

Для изучения энергетического спектра объемных состояний, локализованных в кремнии, использовали методику идентификации, описанную в [10], для чего изготавливали диоды Шоттки типа Au-*n*-Si путем химического удаления слоя стекла и вакуумного осаждения Au.

IV. Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены вольт-фарадные характеристики (нормализованные к величине ёмкости слоя стекла) одной из исследуемых структур, измеренные в темноте до воздействия ультразвука (кривая 1) и после воздействия (кривая 2).

Из приведенных зависимостей видно, что после воздействия ультразвуком вольт-фарадная характеристика сдвигается в сторону отрицательных напряжений и незначительно меняет форму.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

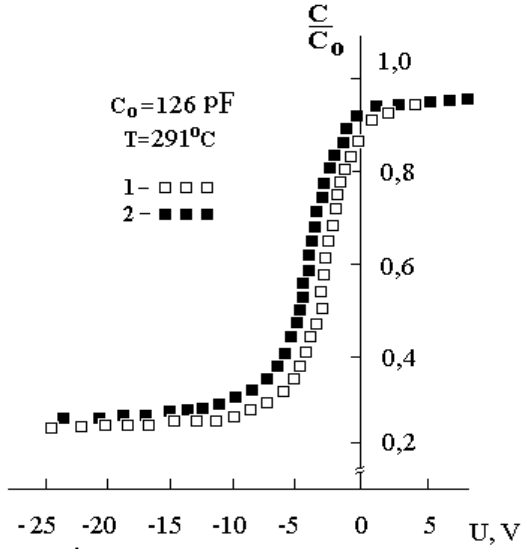


Рис. 1. Вольтфарадные характеристики структур: *1* – контрольный образец, *2* – после воздействия ультразвуком на одну из исследуемых структур.

Согласно существующим теориям, параллельный сдвиг вольт-фарадных характеристик структур МДП (изготовленных на основе полупроводника *n*-типа проводимости) в сторону отрицательных напряжений указывает на образование положительного (фиксированного) заряда в структуре стекла. А изменение формы вольт-фарадных характеристик таких структур свидетельствует об увеличении заряда поверхностных состояний, которые перезаряжаются при изменении величины прикладываемого напряжения. Наличие подвижного заряда в структуре свинцово-боро-силикатного стекла обусловлено локализацией инжектированных из полупроводника электронов вблизи легко поляризуемых ионов свинца и накапливанием их на потенциальных барьерах включений кристаллической фазы [3]. Так как изменение степени поляризации ионов свинца при ультразвуковых воздействиях указанной мощности представляется маловероятным, то основной причиной, приводящей к увеличению положительного заряда, может быть изменение высоты потенциальных барьеров между включениями кристаллической фазы.

Действительно, уменьшение высоты потенциальных барьеров приводит к тому, что инжектированные прикладываемым обогащающим напряжением из полупроводника электроны, не локализуясь в больших количествах в потенциальных ямах, при смене полярности напряжения экстрагируются обратно в обьем полупроводниковой подложки. Для подтверждения этого предположения в структурах, подвергнутых ультразвуковому воздействию, измеряли тангенс угла диэлектрических потерь при различных температурах (–10÷+50°C) и частотах (100 кГц–1 мГц) (рис. 2).

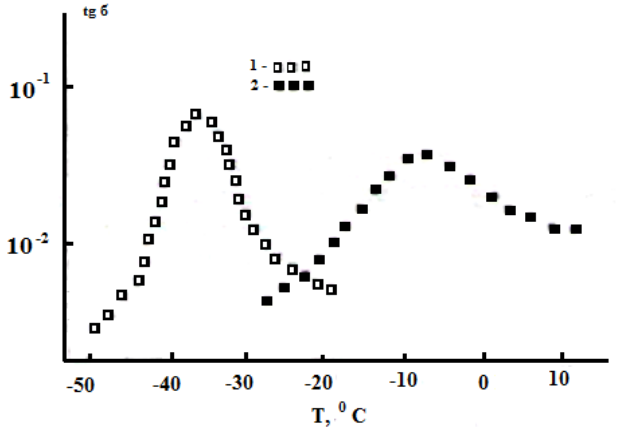


Рис. 2. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь контрольной (*1*) и подвергнутой воздействию ультразвука (*2*) структур.

Сравнение полученных температурно-частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь позволило установить, что во всех измеренных структурах тангенс угла диэлектрических потерь имеет характерный релаксационный максимум, а в структурах, подвергнутых ультразвуковому воздействию, релаксационный максимум диэлектрических потерь уменьшается и становится менее ярко выраженным. Такое поведение релаксационного максимума также указывает на увеличение величины подвижных зарядов, встроенных в структуру стекла.

В соответствии с существующими теориями скорость формирования инверсионного заряда определяется концентрацией генерационных центров в объеме полупроводника и плотностью состояний, локализованных на границе раздела полупроводник-диэлектрик [12-16]. Для определения вклада в процесс релаксации поверхностных и объемных центров использовали расчетную временную зависимость, изменяющуюся в процессе формирования заряда инверсионного слоя, при сравнении ее с экспериментальной зависимостью. На рис. 3 приведены экспериментальная (*1*) и теоретическая (*2*) зависимости $C(t)$ для одного из контрольных образцов, полученные после переключения напряжения $V_1 \rightarrow V_2$ (V_1=8 В, V_2=15 В). Величины скорости объемной (A) и поверхно-

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

стной (*S*) генерации найдены с помощью формул (1, 2) методом оптимального подбора: $A = 9\times 10^{13}$ $с^{-1}см^{-3}$ и $S = 4\times10^{9}$ $с^{-1}см^{-2}$. Зависимость (*3*), измеренная при аналогичных условиях, соответствуют образцу, подвергнутому воздействию ультразвука.

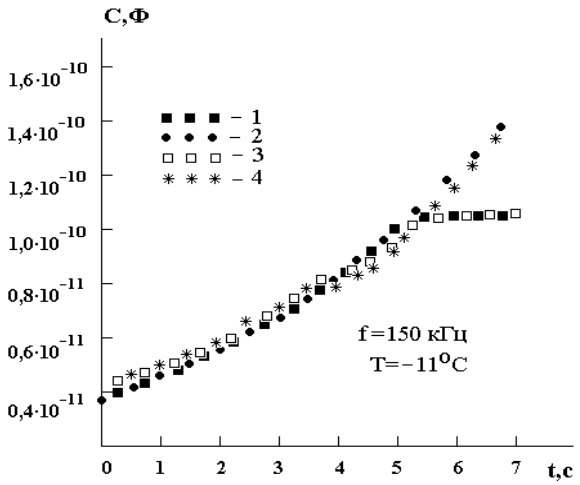


Рис. 3. Экспериментальные (*1*, *3*) и теоретические (*2*, *4*) зависимости релаксации емкости исследуемых структур (*3* и *4* – контрольные, *1*, *2* – подвергнутые ультразвуковому воздействию)**.**

Из приведенных зависимостей видно, что расчетные (*2*, *4*) и экспериментальные (*1*, *3*) зависимости хорошо совпадают при значениях $A = (8–9)\times10^{13}$ $с^{-1}см^{-3}$, $S = (1–2)\times10^{9}$ $с^{-1}см^{-2}$. На наш взгляд, это указывает на то, что при данных ультразвуковых воздействиях концентрация и энергетическое распределение примесных центров, имеющихся в объеме полупроводника, практически не изменяются, а уменьшение скорости поверхностной генерации ($S = 4\times 10^{9}$ $с^{-1}см^{-2}$ в контрольных и $S = (1–2)\times10^{9}$ $с^{-1}см^{-2}$ в обработанных ультразвуком структурах) обусловлено изменением плотности поверхностных состояний.

Для подтверждения этого предположения со структур, подвергнутых воздействию ультразвука, химическим способом (обработка в парах плавиковой кислоты) удаляли слой стекла и при помощи вакуумного осаждения Au (без подогрева подложки) изготавливали диоды Шоттки типа Au-*n*-Si. Далее, для изучения энергетического спектра объемных состояний, локализованных в кремнии, использовали методику идентификации, описанную в [10], и определяли энергетическое распределение и концентрацию примесных центров, локализованных в базовой области диодов. Анализ полученных результатов показал следующее. Во всех диодах Шоттки как в контрольных, так и в изготовленных на пластинах, подвергавшихся ультразвуковому воздействию, энергетическое положение примесных центров E_C–0.27 эВ и E_C–0.54 эВ, а также их концентрации (n=(3–5)×10^{12} $см^{-3}$) практически идентичны (разброс этих значений для различных диодов составлял 5–7%), что лежит в пределах ошибки эксперимента.

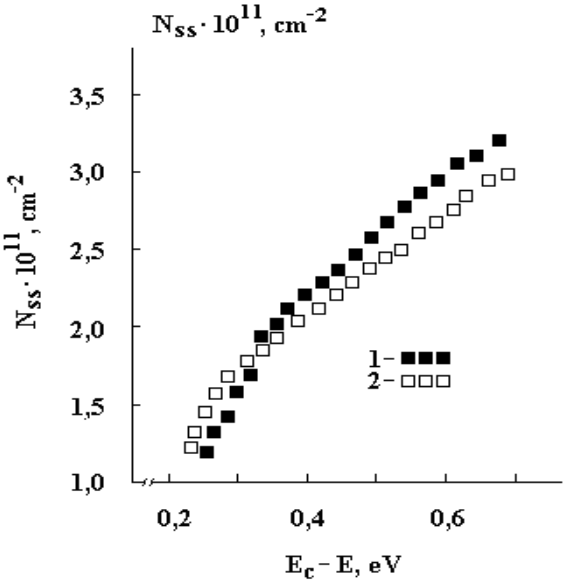


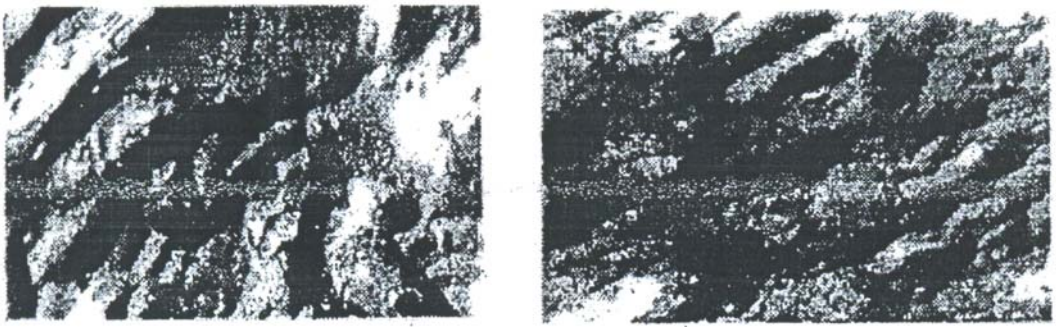
Рис. 4. Распределения интегральной плотности поверхностных состояний для исследованных структур (*1* – контрольная структура, *2* – структура, подвергнутая ультразвуковому воздействию).

На наш взгляд, это подтверждает то, что указанное ультразвуковое воздействие не влияет на параметры объемных генерационных центров и, следовательно, на скорость объемной генерации носителей заряда. Непосредственное измерение плотности поверхностных состояний, выполненное при помощи метода высокочастотных вольтфарадных характеристик (на частоте 150 кГц, в интервале температур от –5 до –18°C) показало (рис. 4), что в структурах, подвергнутых указанному ультразвуковому воздействию, распределение интегральной плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны полупроводника уменьшается по сравнению с контрольными структурами. Причём наиболее заметно это

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

уменьшение в диапазоне энергий больших, чем $E=E_C$–0.4 эВ. Уменьшение скорости поверхностной генерации и его изменение со временем после ультразвукового воздействия может быть вызвано уменьшением числа и ширины граничной фазы разделений кристаллических включений в составе стекла.

Для проверки этого из структур МДП химическим способом удаляли управляющий Al электрод и в парах муравьиной кислоты удаляли слои стекла. Затем снимали микрофотографии поверхности стекла. На рис 5 приведены в 2800 раз увеличенные микрофотографии для двух поверхностей стекла. Сравнивая фотографии, можно сказать, что после ультразвукового воздействия поверхность стекла стала более однородной.



а **б**

Рис. 5. Микрофотографии поверхности исследованных структур: *а*) до воздействия ультразвука; *б*) после воздействия ультразвука мощностью P=0.5 W/см^2 в течение t=90 мин.

Уменьшение скорости поверхностной генерации носителей заряда и изменение её временной зависимости в ходе формирования заряда инверсионного слоя, наблюдаемое после ультразвукового воздействия, хорошо коррелирует с уменьшением числа и протяженности межфазных границ кристаллических включений, входящих в состав стекла.

V. Заключение

Ультразвуковая обработка структур Al-*n*-Si-стекло-Al частотой 2.5 МГц, мощностью 0.5 Вт в течение 40 мин приводит к уменьшению интегральной плотности электронных состояний и не влияет на энергетический спектр объемных электронных состояний в полупроводнике.

Ультразвуковая обработка может способствовать улучшению генерационно-рекомбинационных свойств межфазной границы раздела кремний-свинцово-боросиликатное стекло указанного состава за счет перестройки напряженных валентных связей на этой границе, облучение ультразвуком (частотой 2.5 мГц, мощностью 0.5 Вт в течение 40 минут) структур полупроводник (*n*-Si) стекло (SiO_2-PbO-B_2O_3-Al_2O_3-Ta_2O_5) приводит к увеличению положительного заряда, встроенного в структуру стекла.

Метаданные

An ultrasonic action on generation-recombination properties of interface boundaries of MDS structures

B.Kh. Kuchkarov[1], O.O. Mamatkarimov[2]

[1]Namangan State University, Уйчи st. 316, 160119, Namangan, Uzbekistan
[2]Namangan Engineering and Technology Institute, Kasansay st., No.7, 160115, Namangan, Uzbekistan

The effect of ultrasonic action on the density of electronic states localized at the Si-glass interface is studied. A method is proposed for determining the surface and volume generation rates of charge carriers using the calculated time dependence of the space charge region width (SCR) when comparing it with the experimental dependence. Ultrasonic treatment of Al-*n*-Si-glass-Al structures with a frequency of 2.5 MHz and a power of 0.5 W for 40 min leads to a decrease in the rate of charge formation of the inversion layer. This is due to a decrease in the integral density of electronic states localized at the semiconductor-glass interface, and does not affect the energy spectrum of bulk electronic states in a semiconductor.

Keywords: ultrasonic irradiation, C-V characteristics, localized states, relaxation, carrier generation, dielectric losses, interphase boundaries, isothermal relaxation of capacitance.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.

Литература (References)

[1] V.S. Pershenkov, V.D. Popov, A.V. Shalnov, Poverxnostnie radiatsionnie effekti v IMS (Moskva, Energoatomizdat, 1988).

[2] Yu.S. Chistov, V.F. Synorov, Vestnik VGU (Voronejskiy gosudarsvenniy universitet), seriya fizika matematika N2, 156 (1986).

[3] A.P. Baraban, V.V. Bulavinov, P.P. Konorov. Vestnik LGU (Leningradskiy gosudarsvenniy universitet) **3**, 302 (1988).

[4] T.G. Men'shikova, A.E. Bormontov, V.V. Ganja. Vestnik VGU (Voronejskiy gosudarsvenniy universitet), seriya fizika, matematika **1**, 222 (2005).

[5] M.R. Levin, A.B. Tatarintsev, Yu.V. Ivankov. Kondensirovannie sredi i mejfaznie granitsi **3**, 195 (2002).

[6] S.G. Dimitriev, Yu.V. Markin. FTP **32**, No 12, 37-44 (1988).

[7] B.N. Zaveryuxina, N.N. Zaveryuxina, S.I. Vlasov, Ye.B. Zaveryuxina. Pisma v JTF **34**, 6 (2008).

[8] S.I. Vlasov, B.N. Zaveryuxin, A.V. Ovsyannikon. Pisma v JTF **35**, 41 (2009).

[9] S.I. Vlasov, A.V. Ovsyannikov, B.K Ismoilov, B.Kh. Kuchkarov. V.sb. Strukturnaya relaksatsiya v tverdix telax Materiali mejdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Vinnitsa, 2012, 29-31 May,. Str. 234-236).

[10] S.Z. Zaynabidinov, S.I. Vlasov, A.A. Nasirov. Neravnovenie protsessi na granitse razdela poluprovodnik-dielektrik. Vestnik NUUz (Natsionalniy Universitet Uzbekistana) **3**, 113 (1995).

[11] S.I. Vlasov, A.V. Ovsyannikov, B.K. Ismailov, B.Kh. Kuchkarov. Effect of presure on the properties of Al-SiO_2-n-Si<Ni> structures. Semiconductor Physics, Quantum electronics and Optoelectronics **2**, 166 (2012).

[12] B.Kh. Kuchkarov, O.O. Mamatkarimov. Vestnik Kraunts. Fiz.-mat. Nauka **29**, No 4, 114-123 (2019).

[13] S.I. Vlasov, B.Kh. Kuchkarov, B.K. Ismoilov. Vestnik. NUUz (Natsionalniy Universitet Uzbekistan) No 2/1, 16-18 (2013).

[14] S.I. Vlasov, D.E. Nazyrov, Q.U. Bobokhujayev, B.Kh. Kuchkarov. Uzbek Journal of Physics **16** (3), 231-233 (2014).

[15] S.I. Vlasov, F.A. Saparov, B.Kh. Kuchkarov. Uzbek Journal of Physics **11**, No 3, 203-206 (2009).

[16] A.V. Ovsyannikov, I.G. Tursunov, V.A. Ten, B.Kh. Kuchkarov. Vestnik NUUz (Natsionalniy Universitet Uzbekistan) No 2/1, 89-90 (2013).

Металл-диэлектрик-яримўтказгич структураларни фазалар чегараси генерация-рекомбинация хусусиятларига ультратовуш таъсири

Б.Х. Кучкаров[1], О.О. Маматкаримов[2]

[1] Наманган давлат университети, Уйчи кўчаси, 316, 160119, Наманган, Ўзбекистон

[2] Наманган мухандилик технология институти, Косонсой кучаси, 7, 160115, Наманган, Ўзбекистон

Кремний-шиша бўлинма фазалар чегарасида локаллашган электрон ҳолатлари зичлигига ультратовуш таъсири тадқиқ этилган. Металл-диэлектрик-яримўтказгич структураларда сиғим релаксацияси орқали назарий ҳисобланган фазавий заряд соҳаси кенглигининг вақтга боғланиши орқали ҳажмий ва сиртий генерация тезликларини аниқлаш усули ишлаб чиқилган. Al-n-Si-шиша-Al структураларга 2.5 МГц частотали, 0.5 Вт қувватли ультратовуш билан 40 минут давомида берилган таъсир яримўтказгич шиша чегара соҳасида локаллашган электрон ҳолатлари интеграл зичлигини камайиши ва яримўтказгичдаги ҳажмий электрон ҳолатлари энергетик спектри ўзгармай қолиши аниқланган

Калит сўзлар: ультратовуш таъсири, локаллашган электрон ҳолатлари, релаксация, заряд генерацияси, фазалар чегараси.

© Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2020 г.