

УДК 621.383.5

## ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Ni-GeO-GaSe СТРУКТУР ПРИ ОСВЕЩЕНИЯХ

А.Б.МЕДЖИДОВ<sup>а</sup>, Р.М.МУРАДОВ<sup>б</sup>, С.И.МЕХТИЕВА<sup>а</sup>, И.М.АЛИЕВ<sup>а</sup>

*Институт Физики НАН<sup>а</sup>  
370143, Баку, пр.Джавида 33  
Азербайджанский Высшее Военное Училище<sup>б</sup>  
370018. Баку-18, ул. Нахимова*

Исследуется влияние освещения, электрического поля и частоты на емкость Ni-GeO-GaSe-структур. Обнаружен предсказанный теоретически, но экспериментально ранее не изученный эффект изменения емкости приповерхностного пространственного заряда в GaSe под воздействием светового излучения. Зависимость емкости системы от величины постоянного напряжения на высокой частоте (6МГц) указывает на отсутствие изменения заряда неосновных носителей в слое инверсии под воздействием переменного поля и при освещении полупроводника. Показано значительное увеличение емкости системы Ni-GeO-GaSe при освещении, что позволяет создать фотова-рикап на основе слоистых кристаллов GaSe.

В настоящее время усилилась тенденция к исследованию фотоэлектрических явлений непосредственно в приборных структурах типа метал-диэлектрик-полупроводник (МДП) и др. Это обусловлено весьма быстрым развитием исследований физических процессов, протекающих в приповерхностных слоях полупроводников. Заметную часть здесь составляют работы [1-7], в которых изучаются фотоемкостные свойства пространственного заряда для определения электрофизических параметров полупроводника и практическое использование МДП-структур в различных фотоэлектрических устройствах. Действительно, характерным для упомянутых систем являются их высочастотность, высокая чувствительность к различного рода излучениям, а также большие функциональные возможности.

В последнее время в МДП-структурах наряду с классическими полупроводниками применяются широкозонные полупроводники, такие как CdS, GaSe, GaTe, ZnSe и их аналоги, которые играют роль «окна» для падающего излучения. Хотя они имеют одинаковую физику формирования пространственного заряда, в ряде случаев их фотоемкостные свойства могут отличаться [8-10] из-за большой концентрации глубоких частично ионизированных уровней в полупроводнике. В этих работах методом импеданса получены (для отдельных случаев) теоретические выражения поверхностной фотоемкости. Однако, построение общей теории для емкости пространственного заряда в случае инверсии, когда на систему воздействует электрическое поле и освещение, учитывающей емкость поверхностных ловушек  $C_v$ , диффузионную емкость неосновных носителей  $C_g$ , сталкивается со значительными трудностями.

Это обстоятельство стимулировало изучение емкостных характеристик Ni-CeO-GaSe структур при воздействии на систему электрического поля, освещения и частоты.

### ТЕОРИЯ

В [10] было получено выражение для емкости пространственного заряда в случае инверсии, когда система освещается светом, генерирующим неравновесные электроны и дырки, в предположении: 1) выполнимости квазибольцмановского приближения, 2) постоянства квазиуровней Ферми в области пространственного

заряда (ОПЗ), 3) биполярности избыточной проводимости в объеме, т.е.  $\Delta n = \Delta p = \Delta n_{\text{пар}}$ , 4) стационарности условий относительно светового возбуждения. В этих условиях для емкости системы с любой омичностью имеем

$$C^* = \frac{C_{\text{ок}} C_n^* [1 + (\tau_{\text{инв}} \omega)^2]}{C_m^* [1 + (\tau_{\text{инв}} \omega)^2] + C_{\text{ок}} (\tau_{\text{инв}} \omega)^2} \quad (1)$$

где  $C_{\text{ок}}$  – емкость окисла,  $C_n^*$  – емкость истощенного слоя полупроводника,  $\tau_{\text{инв}}$  – постоянная времени образования заряда в инверсионном слое,  $\omega$  – частота измерительного сигнала.

Как следует из соотношения (1), емкость поверхностных ловушек и диффузионная емкость неосновных носителей не включены в результирующую емкость освещаемой системы, так как они зависят от частоты электрического поля, приложенного к системе. При достаточно высоких частотах  $\omega \gg 1/2\pi\tau_i$  величина емкости  $C_i \rightarrow 0$ , а при низких частотах она может оказаться доминирующей. Диффузионная емкость определяется теми же процессами, что и неравновесный эффект поля при инверсии, а именно, диффузионным перераспределением электронно-дырочных пар между объемом и областью пространственного заряда и их генерацией. При  $\omega \gg 1/2\pi\tau_{\text{пар}}$  диффузионная емкость  $C_{\text{диф}} \rightarrow 0$  и максимальна при частотах, больших одной из величин  $1/2\pi\tau_{\text{пар}}$ ,  $1/2\pi\tau_{\text{диф}}$ .

На практике эффективность Ni-GeO-GaSe системы часто характеризуют «коэффициентом перекрытия»  $K_I$ , который определяет отношение емкости на свету к темновой емкости.

Коэффициент перекрытия  $K_I$  может быть как больше, так и меньше единицы, т.е. освещение может как увеличить емкость, так и уменьшить ее.

Рассмотрим соотношение для  $K_I$  в случае истощения и инверсии поверхности полупроводника в Ni-GeO-GaSe системе.

В случае истощения имеем [10]

$$K_I = \frac{1 + \Delta p \cdot e^{-Y_I} \sqrt{-Y_o - 1}}{\sqrt{(-Y_I - 1 + \Delta p e^{-Y_I})}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_p = \Delta p / p_o$  – уровень генерации неравновесных электронно-дырочных пар, нормированных к равновесной концентрации  $p_o$ ,  $Y$  – изгиб зоны в единицах  $kT/e$ , индекс  $I$  – соответствует освещенной системе, индекс  $O$  – темноте при слабой интенсивности света (если  $Y_I - Y_o = \Delta Y_I \ll 1$ )

$$K_I \approx 1 + e^{-Y_o} \Delta p \quad (3)$$

С увеличением интенсивности света  $I = \Delta_p \cdot P_o \tau_{\text{пар}}^{-1}$  емкость резко изменяется, а при больших интенсивностях (когда  $\Delta Y_I = Y_o$ )

$$K_I \approx Y_o, \quad (4)$$

т.е. такой режим легко достигим при  $Y_o \sim 15 \div 20$  и можно получить весьма большое значение  $K_I \sim 10$  при полном спрямлении зоны в системе Ni-GtO-GaSe светом

$$K_I = \sqrt{2(1 + 2\Delta_p)(-Y_o - 1)} \quad (5)$$

В случае инверсии

$$K_I = \sqrt{1 + \Delta_p} e^{2U_B} \cdot e^{-\Delta Y_I}, \quad (6)$$

где  $U_B$  – равновесный уровень Ферми, отсчитанный от середины запрещенной зоны полупроводника в единицах  $kT/e$  при полном спрямлении зоны

$$K_I = \sqrt{2(1 + 2\Delta_p)} e^{U_B - Y_o/2}, \quad (7)$$

если  $Y_o \sim 25 \div 30$ , то максимальное уменьшение  $C^*$  может достигать  $\sim 10^2 \div 10^4$  раз.

Исходя из приведенных выше соображений, можно ожидать, что при достаточно больших частотах и стационарном освещении емкость Ni-GeO-GaSe системы и коэффициент перекрытия будут описываться соотношениями [1-7].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения были проведены на тонких образцах прямоугольной формы  $10 \cdot 5 \cdot 0,15 \text{ мм}^3$ . На одной части образцов изготавливались Ni-GeO-GaSe – структуры, площадь полупрозрачного электрода затвора на Ni составляла  $0,1 \div 1 \text{ мм}^2$ , толщина окисла –  $(0,3 \div 0,5) \text{ мкм}$ , на другую часть наносился также полупрозрачный электрод, который служил для измерения фотопроводимости, определяющей уровень инжекции электронно-дырочных пар  $\Delta_p$  (Рис.1.а). В качестве источника излучения использовалась вольфрамовая лампа накаливания мощностью 150Вт, интенсивность света варьировалась платиновыми фильтрами. Емкость образцов измерялась при помощи емкостного моста в диапазоне частот  $6 \text{ кГц} \div 10 \text{ МГц}$  и при различных постоянных смещениях на образце. Переменный измерительный сигнал не превышал 25мВ. Постоянное смещение подавалось от стабильного источника тока типа TESLA-214.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовались характеристики двух типов Ni-GeO-GaSe структур: а) с низким поперечным сопротивлением  $10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см} \leq \rho_{ок} \leq 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , б) с высоким поперечным сопротивлением  $\rho_{ок} \geq 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Некоторые фотоэлектрические характеристики в указанных случаях качественно отличались.

Активное сопротивление Ni-GeO-GaSe структур первого типа существенно уменьшалось при освещении образца, что уменьшало добротность измерительной системы и затрудняло измерение частотных характеристик.

На Рис.1.б представлены зависимости емкости Ni-GeO-GaSe структур от частоты переменного электрического поля при различных величинах постоянного смещения, сплошные линии соответствуют темноте, пунктир – освещению, генерирующему относительно небольшое количество электронно-дырочных пар ( $\Delta_p = 10^{-4}$ ). При нулевом смещении величина емкости заметно уменьшается с ростом частоты, а при достижении  $5 \div 6 \text{ МГц}$  от частоты не зависит. При наличии положительного смещения емкость слабо зависит от частоты (при отрицательном смещении резко уменьшается сопротивление Ni-GeO-GaSe-структур). Таким образом, собственное время жизни для поверхностных ловушек для данного типа Ni-GeO-GaSe-структур  $\tau_t \sim 210^{-7} \text{ сек}$ .

При освещении величина емкости существенно увеличивалась во всех случаях. На Рис.2. приведены зависимости емкости от интенсивности света (люксовые зависимости) при различных величинах положительного поля  $U_{зат}$ , смещающего поверхностный потенциал в сторону истощения и инверсии. Видно, что

наибольшее увеличение  $C$  имеет место не при максимальном  $U_{\text{зат}}$ , а при промежуточной величине  $U_{\text{зат}}$ , соответствующей случаю сильного истощения как раз перед наступлением инверсии. Это обстоятельство может быть связано с тем, что в Ni-GeO-GaSe структурах с низким  $\rho_{\text{ок}}$  при значительных  $U_{\text{зат}}$  резко возрастает роль отсоса из поверхностной области неосновных неравновесных носителей заряда, в том числе и генерированных светом [11, 12].

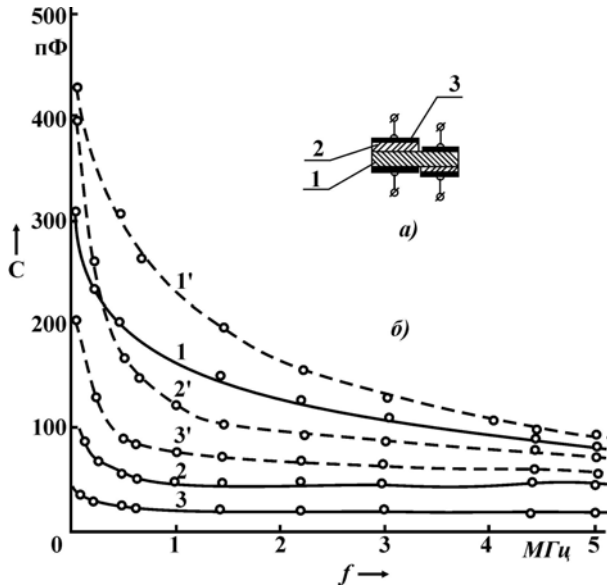


Рис.1.

а). Форма образца для измерения емкостной характеристики и фотопроводимости 1 – GaSe, 2 – GeO, 3 – Ni.  
 б). Зависимость емкости Ni-GeO-GaSe-структуры от частоты электрического сигнала при различных величинах положительного смещения. Сплошные линии получены в темноте, пунктир – на свету ( $\Delta p = 10^{-4}$ ),  $U_{\text{зат}}=0$  (1-1'),  $U_{\text{зат}}=2\text{В}$  (2-2'),  $U_{\text{зат}}=3\text{В}$  (3-3'),  $U_{\text{зат}}=4\text{В}$  (образец типа а.)

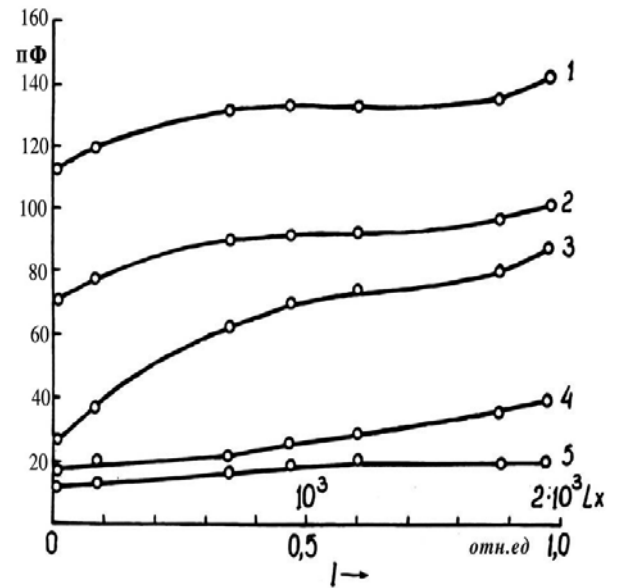
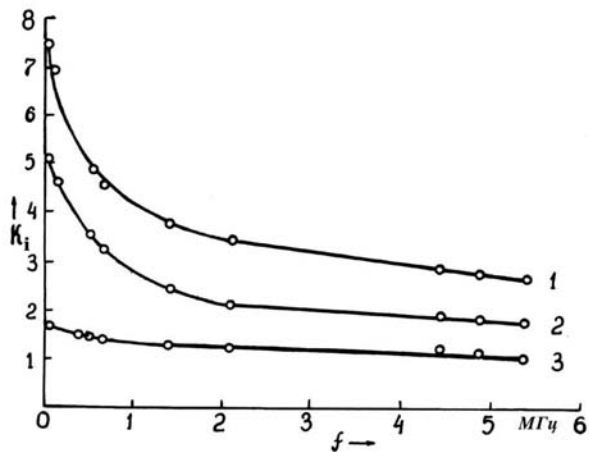


Рис.2.

Люксовые характеристики высокочастотной емкости Ni-GeO-GaSe-структур, полученные при различных величинах положительного смещения  $U_{\text{зат}}=0, 2, 4, 5, 8\text{В}$  и максимального уровня генерации  $\Delta p = 8,2 \cdot 10^{-3}, 8,3 \cdot 10^{-2}, 1,3 \cdot 10^{-2}, 2,3 \cdot 10^{-2}$  для кривых 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно, для  $U_{\text{зат}}$ : В. 0, 2, 4, 6 (образец типа а.)

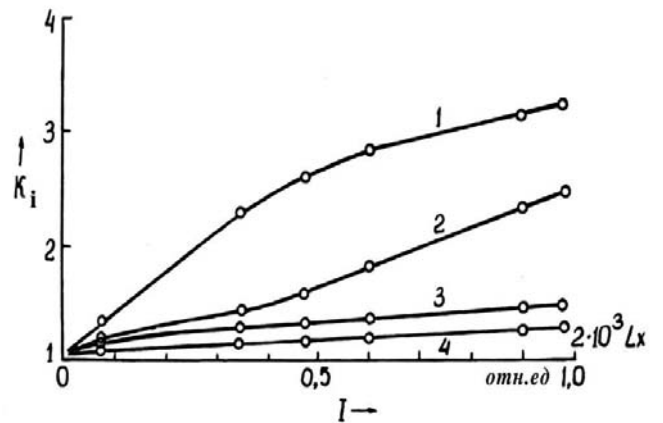
На Рис.3. и Рис.4. представлены частотные и люксовые зависимости коэффициента перекрытия, которые до наступления инверсии качественно согласуются с изложенными выше теоретическими соотношениями и физическими соображениями. После наступления инверсии величина  $K_I$  начинает уменьшаться, причем вид ее люксовых зависимостей уже не соответствует формулам (2-7). Для таких Ni-GeO-GaSe структур максимальная величина  $K_I$  на низких частотах достигала  $\sim 10$  (при сравнительно умеренных уровнях генерации электронно-дырочных пар  $\Delta p \sim 10^{-2}$ ), причем  $K_{I \text{ max}}$  уже ограничивалась  $C_{\text{ок}}$ .

На Рис.5. представлены характеристики высокочастотной зависимости  $C(U_{\text{зат}})$  для типичного образца типа б. Кривые получены в темноте и при двух степенях освещенности ( $\Delta p_1 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ ,  $\Delta p_2 = 0,7 \cdot 10^{-2}$ ). Как и для первого типа Ni-GeO-GaSe-структур здесь имеет место монотонное уменьшение  $C$  по мере роста величины положительного смещения как в темноте, так и при освещении.



**Рис.3.**

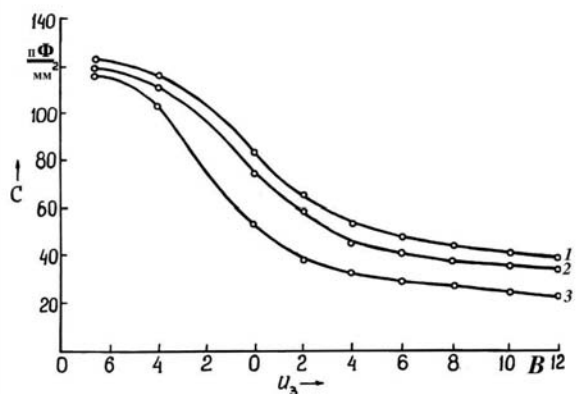
Частотные характеристики коэффициента перекрытия  $K_i$  при различных величинах смещения  $U_{зат}=4, 2, 0В$ , соответственно, для кривых 1, 2, 3 и  $I=1$  (образец типа а).



**Рис.4.**

Люксовые зависимости  $K_i$ , полученные на частоте  $1,5МГц$  при различных величинах смещения  $U_{зат}=4; 6; 2; 0В$ , соответственн, для кривых 1,2,3.и 4 (образец типа а).

Частотные зависимости емкости для б-типа Ni-GeO-GaSe-структур изучены при нескольких величинах положительного смещения как в темноте, так и на свету ( $\Delta p = 1,4 \cdot 10^{-3}$ ). При всех смещениях освещение вызывало существенное увеличение емкости. Ход частотных и люксовых зависимостей емкости для а и б-типа Ni-GeO-GaSe-структур был аналогичен.



**Рис.5.**

Зависимости емкости Ni-GeO-GaSe-структур от величины смещения, полученные в темноте и при различных освещенностях  $I=1, 0,5, 0$ , соответственно, для кривых 1, 2 и 3 ( $I=1$  соответствует  $\Delta p = 1,4 \cdot 10^{-2}$ ) (образец типа б).

Из сравнения величин темновой емкости при высокой частоте с теоретическими зависимостями  $C_1(Y)$  был рассчитан рабочий диапазон изгибов зон, задаваемых смещением  $U_{зат}$ . Оказалось, что при  $U_{зат}$  от  $+4,0В$  до  $-5,5В$  величина изгиба зоны  $Y$  изменялась от  $+0,5В$  до  $-16,2В$ , т.е. от небольшого обогащения до сильной инверсии.

Заметим, что в наших экспериментах, как правило, не наблюдалось медленной релаксации высокочастотной емкости как при включении постоянного смещения, так и при освещении.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При обсуждении экспериментальных результатов удобно рассмотреть граничные случаи, поддающиеся простой интерпретации.

1) Нулевое напряжение на затворе  $U_{зат} = 0$ : а) высокие частоты ( $6МГц$ ), б) низкие частоты ( $50кГц$ ).

2) Максимальное напряжение на затворе  $U_{\text{зат}} \geq 5\text{В}$ : а) высокие частоты; б) низкие частоты.

Промежуточные частоты ( $\omega \sim 1/2\pi \cdot \tau_i, 1/2\pi \cdot \tau_{\text{нар}}$ ) отражают сложное влияние всех четырех нижеуказанных механизмов.

В первую очередь, нас интересует качественная интерпретация различных механизмов, приводящих к изменению емкости Ni-GeO-GaSe-структуры при различных частотах, напряжениях и освещении.

1. Изменение концентрации носителей в зонах вблизи поверхности при освещении увеличивает емкость пространственного заряда. Кроме того, если изгиб зоны в темноте отличен от нуля, происходит изменение его при освещении (поверхностно барьерная фотоэ.д.с.), что существенно сказывается на поверхностной емкости.

2. Фото э.д.с. может быть вызвана также и прилипаниями фотоносителей на поверхностных уровнях, что дает весьма большие изменения емкости.

3. Возможно изменение времени захвата носителей быстрыми поверхностными состояниями при освещении, т.е.  $\tau(\Delta p)$ .

4. При измерении емкости на достаточно высоких частотах и при наличии инверсии общее количество неосновных носителей (электронов) в инверсионной области остается постоянным. Электроны не успевают генерироваться, либо диффундировать из объема в течение полупериода переменного напряжения.

При освещении возможны нарушения постоянства количества неосновных носителей в инверсионном слое. Число этих носителей увеличивается благодаря генерации светом в области инверсии, а также благодаря диффузии неравновесных носителей из объема. Уменьшение числа неосновных носителей возможно за счет рекомбинации или диффузии в объем.

По темновой емкости на высокой частоте при  $U_{\text{зат}}=0$  можно определить поверхностный изгиб зон, который обычно соответствует истощению ( $3,5kT/e$ ). В этом случае экранировка высокочастотного заряда производится только свободными электронами, так как концентрация дырок на поверхности незначительна, а поверхностные уровни не успевают перезарядаться. Увеличение емкости при освещении вызывается увеличением концентрации электронов в зоне и уменьшением изгиба зон.

На низкой частоте темновая емкость определяется экранировкой внешнего поля зарядом электронов и перезарядкой поверхностных уровней, поэтому она значительно больше высокочастотной емкости. Из того факта, что на частоте 1МГц  $K_f$  она несколько выше, чем на высоких частотах  $5 \div 6\text{МГц}$  (Рис.3), можно сделать вывод, что заметную роль играет уменьшение времени зарядки быстрых уровней при освещении, т.е.  $\tau_i(\Delta p)$ , то, по-видимому, она незначительна в данном случае ( $U_{\text{зат}}=5\text{В}, 2 \div 6\text{МГц}$ ), поскольку в противном случае ожидается сильная зависимость  $K_f(\omega)$ . Таким образом, влияние освещения на высокочастотную емкость при инверсии ( $U_{\text{зат}} \geq 5\text{В}$ ) определяется механизмами 1,2 (фото-э.д.с.).

Однако, об отсутствии участия дырок в экранировке поля говорит «полка» на зависимости емкости от освещения при  $U_{\text{зат}}=0$  в широком диапазоне частот. При  $U_{\text{зат}} \geq 5\text{В}$  емкость при освещении также не зависит от частоты в области от 2 до 5МГц. Это говорит о том, что и при освещении имеет место постоянство числа электронов в инверсионном слое.

Что касается низкочастотной емкости в случае сильной инверсии, то здесь можно ожидать большой величины темновой емкости, так как частота 50кГц достаточно низкая, чтобы концентрация электронов вблизи поверхности была равновесной. Участие в экранировке поверхностных уровней должна еще больше

увеличить емкость. Однако в действительности наблюдается очень малая величина емкости, не намного превышающая величину последней на частоте 6МГц.

Из частотной зависимости емкостей Ni-GeO-GaSe структур в темноте и на свету можно сделать вывод, что нижний предел времени захвата поверхностными состояниями порядка  $10^{-6} \div 10^{-7}$  сек., что согласуется с литературными данными [10].

Таким образом, экспериментальное изучение эффекта изменения емкости приповерхностного пространственного заряда в Ni-GeO-GaSe структурах под воздействием на них светового излучения позволит создать фотоварикап, работающий в видимой области спектра.

1. A.U.Sachenko, V.A.Zuev, V.G.Litovchenko, P.Ch.Peikov, *Photocapacitive effect MIS structures. Phys.Stat.Sol (a)*, **21** (1974) 345.
2. В.А.Зуев, В.Г.Попов, *Фотозлектрические МПД-приборы. М. Сов.радио*, (1983) 175.
3. В.А.Зуев, А.В.Саченко, К.Б.Толпыго, *Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М. Сов.радио*, (1977) 256.
4. В.Г.Литовченко, А.П.Горбань, *Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник, Киев: Наукова Думка*, (1978) 314.
5. А.В.Саченко, О.В.Снитко, *Фотозффекты в приповерхностных слоях полупроводников, Киев, Наукова Думка*, (1984) 67.
6. А.В.Саченко, *Микроэлектроника*, **5** №2 (1976) 143.
7. Р.С. Нахмансон, *ФТТ*, **6** (1964) 1115.
8. А.Б.Меджидов, Ф.Н.Султанов и др., Тез.докл. Всесоюзной конф. «Физика диэлектриков» г.Томск, **сер.6** вып.280 (1988) 24.
9. А.Б.Меджидов, Ф.Н.Султанов, Труд.конф.соц.стран по физическим проблемам «Оптоэлектроники», (1989) 211.
10. А.Б.Меджидов, А.М.Алиев, Т.Р.Мехтиев, В.П.Радиононов, Препринт №410 ИФАН, г.Баку (1991).
11. В.А.Зуев, *УФЖ*, **13** №1 (1968) 38.
12. Л.А.Быков, В.А.Гергель, А.Н.Соляков, *Микроэлектроника*, **9** №2 (1980) 107.

#### İŞIQLANDIRMA ZAMANI Ni-GeO-GaSe STRUKTURUNUN TUTUM XASSƏLƏRİ.

**A.B. MƏCIDOV, R.M.MURADOV, S.İ. MEHDIYEVA, İ.M. ƏLİYEV**

Ni-GeO-GaSe strukturun tutumuna işıqlandırmanın elektrik sahəsinin və tezliyin təsiri tədqiq edilir. Nəzəri olaraq əvvəlcədən söylənilmiş, amma əvvəllər təcrübi olaraq öyrənilməmiş, işıq şualanmasının təsiri ilə GaSe-də fəza yükünün tutumunun dəyişməsi effekti aşkar edilməmişdir. Sistemin tutumunun 6Mhz yüksək tezlikli sabit gərginliyin qiymətindən asılılığı göstərir ki, dəyişən sahənin və yarımqeçiricinin işıqlanmasının təsiri ilə inversiya təbəqəsində qeyri-əsas yük daşıyıcılarının yükü dəyişmir. Göstərilmişdir ki, işıqlandırma zamanı sistemin tutumu nəzərə çarpacaq dərəcədə artır, bu da GaSe laylı quruluşa malik yarımqeçiricilərin əsasında forovarikapların yaradılmasına imkan verir.

#### THE CAPACITANCE CHARACTERISTICS of Ni-GeO-GaSe STRUCTURES UNDER ILLUMINATION

**A.B. MEDJIDOV, P.M.MURADOV. S.I. MEHDIYEVA, I.M.ALIYEV**

Influence of illumination, electrical field and frequency on the capacitance of Ni-GeO-GaSe structures was investigated. Earlier predicted theoretically but not investigated experimentally effect of change of capacitance of superficial spatial charge in GaSe under influence of light radiation was found. Dependence of the capacitance of the system on the value of constant voltage at high frequency (6MHz) indicate an absence of change of non-basic carriers charge in the inversion layer of the semiconductor under influence of a variable field and illumination.

Substantial growth of the capacitance of the system under the influence of illumination was shown, which allows to create photovoltaic on the basis of GaSe layer crystals.

Редактор: М.Алиев