

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИНВЕРСИОННЫХ КАНАЛАХ КРЕМНИЕВЫХ Д-МДП-СТРУКТУР

Ш.М. ГАСАНЛЫ, Ф.И. АЛИЕВ, Х.Б. БАЙРАМОВ

*Институт Физики АН Азербайджана,*

*Баку, 370143, пр. Г. Джавида, 33*

В работе проведены исследования поведения носителей тока в инверсионном канале МДП-структур. Исследованы Д-МДП и МДП-структуры на основе кремния. Показано, что двойная диффузия в Д-МДП-структурах позволяет: а) изготовить индуцированный p-канальный транзистор; б) уменьшить длину инверсионного канала до 1-1,5 мкм и тем самым увеличить быстродействие дискретных МДП-приборов.

Показано, что величина подвижности электронов в инверсионных каналах МДП и Д-МДП-структур меньше объемной как при  $T=300\text{K}$ , так и при  $T=80\text{ K}$ , температурная зависимость подвижностей в исследованных структурах имеет максимум при низких концентрациях электронов в канале, который частично объясняется рассеянием носителей тока на ионах примеси и на колебаниях решетке.

Анализ полученных данных указывает на сложность и своеобразие процессов проводимости и рассеяния электронов в инверсионном канале Д-МДП-структур и подчеркивает особенности этих структур.

Исследование поведения носителей тока в приповерхностном слое полупроводника позволяет усовершенствовать и создать новые МДП-приборы (транзисторы, интегральные схемы и т.д.), а также изучать взаимодействие носителей тока с заряженными центрами, локализованными на поверхности полупроводника и в приповерхностном слое диэлектрика, которые оказывают сильное влияние на величину подвижности носителей тока.

Предлагаемая работа посвящена исследованию Холловской подвижности ( $\mu_H$ ) и подвижности по проводимости ( $\mu_\sigma$ ) электронов в инверсионных каналах Д-МДП-системы в зависимости от температуры и поверхностной проводимости от напряжения на затворе.

Учитывая сложность изготовления диффузионных МДП-структур (в дальнейшем Д-МДП-структур) и для понимания физических процессов в таких структурах, нами были изготовлены также МДП-структуры, которые использовались в качестве тестовых структур.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Измерение Э.Д.С. Холла и падения потенциала вдоль приповерхностного канала в зависимости от напряжения на затворе  $v_g$  производились в режиме автоматической записи [1].

Исследованные образцы представляли собой Д-МДП и МДП-структуры. Исследование проводилось в интервале температур 80-300 К.

Д-МДП и МДП-структуры были изготовлены с помощью планарной технологии по специальному фотошаблону. Путем фотолитографии на этих структурах формировались две пары Холловских контактов и контакты под исток и сток (рис. 1.а).

Короткий канал в Д-МДП структурах формировался в приповерхностном слое кремния p-типа и в области истока  $n^+$  путем двойной диффузии в одно и тоже окно в окисной маске [2] (рис 1,б).

Д-МДП и МДП-структуры были изготовлены на основе кремния p-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 20\text{ Ом}\cdot\text{см}$  и ориентацией (100). В качестве диэлектрика использовался слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 150 нм, выращенный в сухом кислороде при температуре 1150 С.

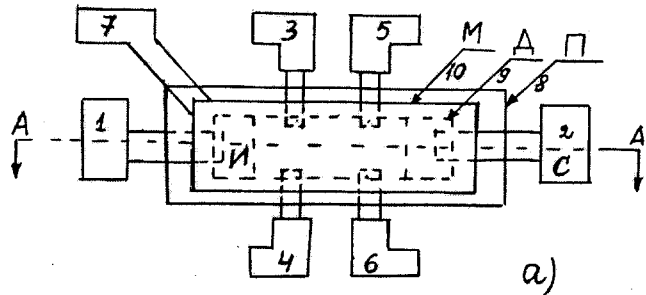


Рис. 1а. Топография Холловской Д-МДП-структуры. 1,2 - контакты к диффузионным  $n^+$ -областям (И-исток, С-сток). 3-6 - контакты для измерения Э.Д.С.-Холла, 7 - контакт затвора, 8 - полупроводниковая подложка-П, 9 - диэлектрический слой-Д, 10 - затвор-М.

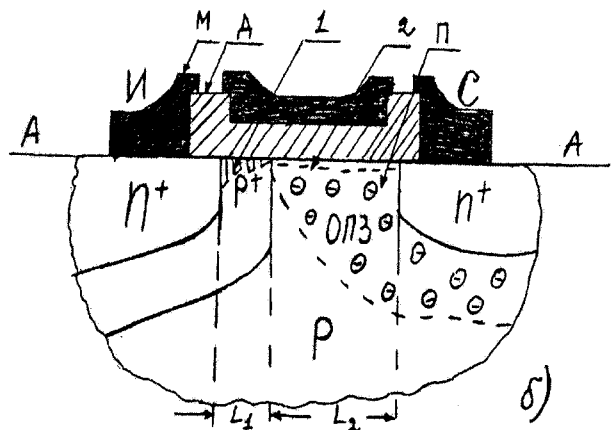


Рис. 1б. Схематический разрез Д-МДП-структуры. 1 - область короткого канала; 2- область длинного канала.

Использовались структуры с размерами инверсионного канала  $400 \times 100\text{ мкм}^2$ . Двойная диффузия в Д-МДП-структурах и наличие на этих структурах сильнолегированной  $p^+$ -области позволяет: 1) уменьшить длину канала до 1-1,5 мкм и тем самым увеличить быстродействие дискретных приборов и повысить их частотный предел, 2) изготовить индуцированный p-канальный транзистор [2].

На рис. 2-4 приведены зависимости поверхностной проводимости и подвижности от напряжения на затворе  $v_g$  и от температуры.

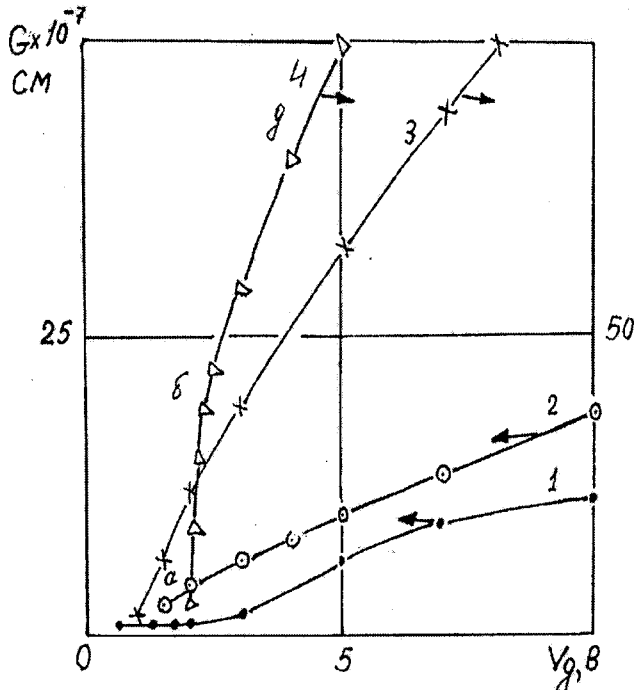


Рис. 2. Зависимость проводимости от напряжения на затворе. ●, ×  $T=300$  К, ○, △  $T=80$  К, 1,2 - МДП-структуры, 3,4 - Д-МДП-структуры.

Из рисунков видны следующие основные особенности проводимости и подвижности электронов в инверсионных каналах МДП и Д-МДП-структур: 1) для МДП-структур проводимость  $G(v_g)$  растет линейно с увеличением напряжения на затворе  $v_g$  ( кривые 1,2-левый масштаб рис.2); 2) для Д-МДП-структуры (кривые 3,4 правый масштаб рис.2) резкий рост  $G(v_g)$  вблизи порога открывания канала (участок а, б), замедление роста при  $v_g > 3$  (участок б, д); 3) величина проводимости для равных значений  $v_g$  в Д-МДП-структурах почти на порядок больше, чем в МДП-структурах; 4) зависимость подвижности для обоих типов образцов носит одинаковый характер, с ростом  $v_g$  подвижность растет, достигает максимума и затем уменьшается с увеличением напряжения на затворе; 5) температурная зависимость подвижности в исследованных структурах имеет максимум при низких концентрациях носителей тока; 6) максимальные значения подвижности электронов равны  $750 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при  $T=300$  К и  $3400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при  $T=80$  К. что составляет 1/4-1/5 значения подвижности в объеме полупроводника; 7) двойная диффузия приводит к резкому росту кривизны зависимости проводимости от напряжения на затворе.

Качественно зависимость проводимости  $G(v_g)$  от напряжения на затворе в Д-МДП-структурах можно представить следующим образом: из рис.1,б видно, что Д-МДП-структуру можно представить как прибор, который состоит из двух транзисторов - короткоканального и длинноканального с длиной каналов  $L_1, L_2$  соответственно и сопротивлением  $R_{L_1}, R_{L_2}$ . При этом проводимость ( $G=1/R$ ) всего канала будет определяться как

$$1/G_{\Sigma} = 1/G_{L_1} + 1/G_{L_2}, \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что при низких напряжениях на затворе (когда открыт канал с длиной  $L_1$ ) проводимость будет определяться проводимостью короткого канала  $G_{L_1}$ , (т.к.  $R_{L_2} \approx \infty$ , тогда  $G_{L_2}=0$ ). Согласно работе [3], ток, проходящий через Д-МДП-структуры определяется по формуле

$$I_1 = 1/2 \beta_{L_1} (v_g - v_{g0L_1})^2 \quad (2)$$

где  $\beta_{L_1}$  коэффициент усиления транзистора с длиной канала  $L_1$ ,  $v_{g0L_1}$  - пороговое напряжение этого транзистора.

Так как,  $G=f(I)$ , такая зависимость должна привести к резкому росту тока, а соответственно и  $G(v_g)$ , что наблюдается экспериментально ( рис. 2 участок а, б ).

С дальнейшим ростом напряжения на затворе  $v_g$ , т.е. открыванием канала проводимости всей структуры при  $v_g \gg v_{g0L_1}$ , должна определяться проводимостью длинноканального транзистора с длиной канала  $L_2$  ( $L_2 \gg L_1$ ), поэтому вклад в общую проводимость короткоканального транзистора будет пренебрежимо мал. В этом случае ток через структуры определяется по формуле [3]:

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\beta_{L_1} \cdot \beta_{L_2}}{\beta_{L_1} + \beta_{L_2}} \right) \cdot (v_g - v_{g0L_2})^2 \quad (3)$$

где  $\beta_{L_2}$  - коэффициент усиления с длиной канала  $L_2$ ,  $v_{g0L_2}$  -соответственно пороговое напряжение данного транзистора.

Из формулы (3) также следует, что проводимость и в этой области значений напряжения на затворе должна резко увеличиваться по квадратичному закону. Однако, из рис. 2 (участок б, д) видно, что экспериментальная зависимость  $G(v_g)$  имеет тенденцию к отклонению от квадратичного закона, которая четко проявляется при температуре  $T=80$  К.

Если учесть, что  $G=q \cdot \mu_n \Gamma_n$ , то наблюдаемое поведение  $G(v_g)$ , по-видимому, в большей степени связано с изменением подвижности и концентрации носителей тока от напряжения на затворе. Из рис. 3 видно, что в области низких температур при  $v_g > 1.5\text{В}$  с ростом напряжения на затворе подвижность электронов сильно уменьшается. Видимо, падение подвижности происходит быстрее, чем рост концентрации электронов, что приводит к наблюдаемому эффекту. Хотя, не исключаются и другие причины, присущие МДП-структурам. Например, 1) захват носителей на поверхностные состояния, роль которого возрастает с понижением температуры, 2) неоднородность поверхности по потенциалу и другие.

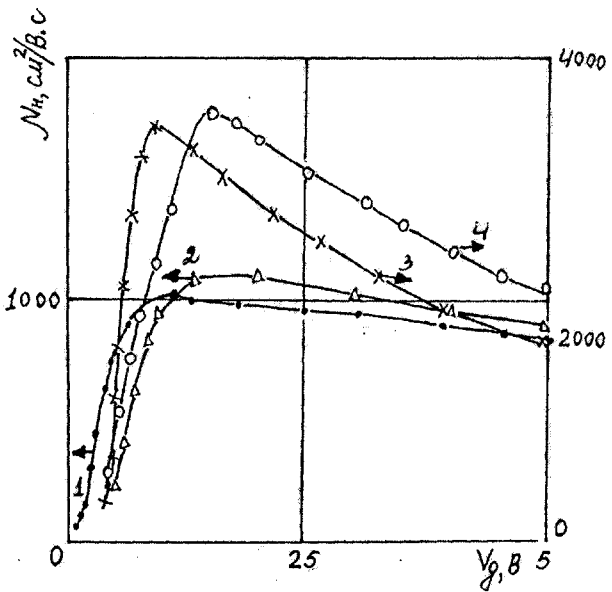


Рис. 3. Зависимость Холловской подвижности от напряжения на затворе. ●, × T=300 К, Δ, ○ T=80 К. 1,2 - МДП-структуры. 3,4 - Д-МДП-структуры.

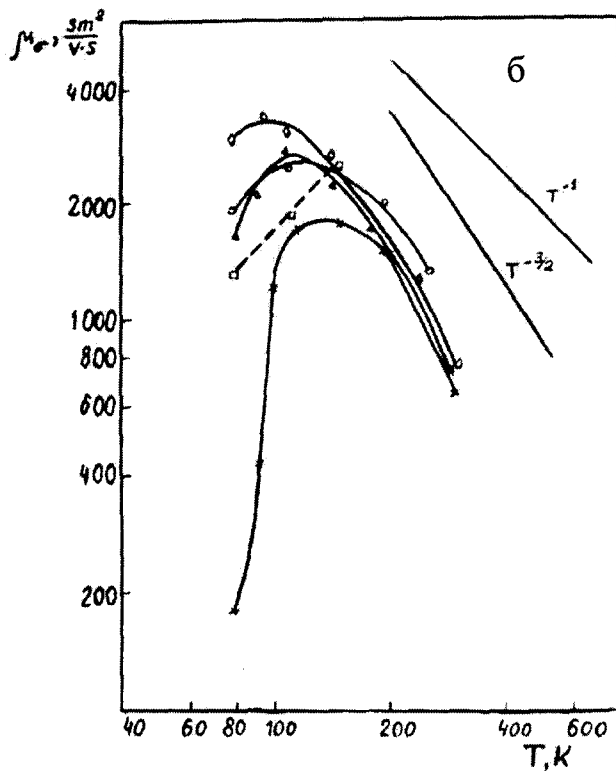
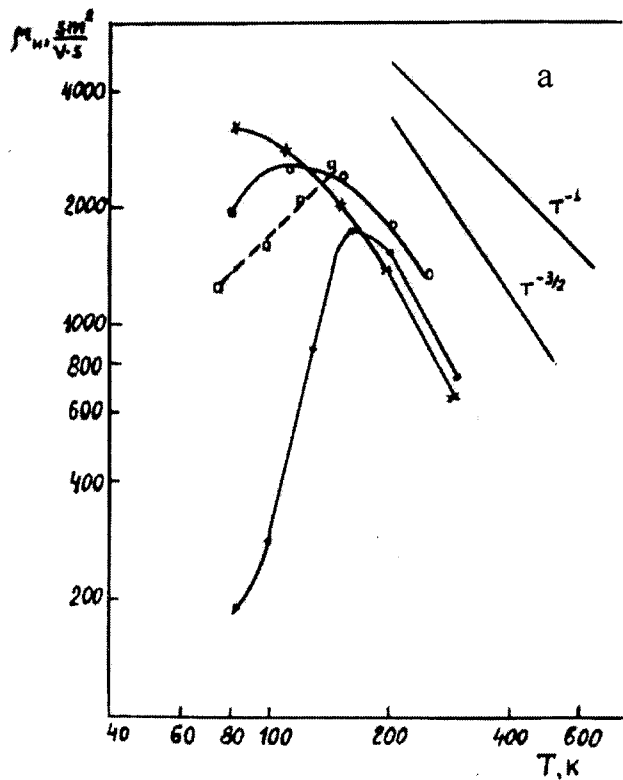


Рис. 4. Зависимости Холловской подвижности (а), и подвижности по проводимости (б) от температуры при различных фиксированных напряжениях на затворе. □, ×, ○, ● -теоретические кривые рассчитанные по формулам работы [8] и по формуле (4).

Наблюдаемые закономерности поведения подвижности электронов не объясняются классической теорией диффузного рассеяния носителей тока [7]. Поэтому, для анализа полученных данных рассмотрим различные механизмы рассеяния, играющие существенную роль в условиях инверсионных каналов.

Увеличение подвижности носителей тока с ростом напряжения на затворе  $v_g$  при температурах 80 К и 300 К вблизи порога открывания канала наблюдалось ранее в ряде работ [1, 5-7]. Согласно данным, указанных работ при низких концентрациях носителей тока вблизи порога открывания канала на поведение подвижности сильно влияют неоднородность инверсионного канала, а также неоднородное распределение заряда  $Q_{ss}$  - в окисле и заряда на поверхностных уровнях, которые вызывают флуктуации поверхностного потенциала.

Рассеяние носителей тока на флуктуациях потенциала по всей вероятности носит ионный характер, о чем свидетельствуют: 1) рост подвижности электронов вблизи порога открывания канала, 2) смещение максимума подвижности в сторону больших значений  $v_g$ .

Из рис. 4 видно, что при низких напряжениях на затворе зависимости подвижности от температуры имеют максимумы, причем, с ростом  $v_g$  величина подвижности растет, а максимумы смещаются в область более низких температур.

Согласно работам [1, 8], в монокристаллических образцах существование подобного максимума как качественно, так и количественно согласуется с представлением о рассеянии на нонах примеси и колебаниях решетки. С учетом того, что при слабой инверсии носителей тока в МДП-структурах их можно рассматривать как трехмерный газ, были проведены теоретические расчеты подвижности при рассеянии на ионах примеси и на колебаниях решетки.

Для расчета подвижности электронов при рассеянии на ионах примеси и на колебаниях решетки были использованы формулы из работ [8].

Суммарная подвижность определялась по формуле

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\mu_I + \mu_{реш.}}{\mu_I \cdot \mu_{реш.}} \quad (4)$$

Расчеты проводились для концентрации ионов  $N=(10^{14}-10^{18})\text{см}^{-3}$  в интервале температур  $T=(80-300)$  К, которые приведены на рис. 4, из которого видно, что в области температур выше 150-200 К экспериментальные и расчетные значения подвижности в пределах ошибок хорошо согласуются между собой. Из рис. 4 также следует, что наклон кривых  $\mu_H(T)$  при  $T>200$  К большей степени совпадает с законом  $T^{-3/2}$ , что является дополнительным подтверждением того, что в условиях классического приближения при высоких температурах рассеяния происходит на объемных акустических фонах, а при низких температурах происходит квантование поперечного движения электронов, о чем свидетельствует изменение  $\mu_H(T)$  по закону  $T^{-1}$ .

Таким образом, анализ полученных данных указывает на сложность и своеобразие процессов проводимости и рассеяния электронов в инверсионном канале Д-МДП-структур и подчеркивает особенности этих систем.

Получено, что: 1) двойная диффузия в Д-МДП-структурах приводит к резкому увеличению проводимости, к росту крутизны характеристики, от которой сильно зависят усилительные свойства МДП-приборов; 2) характер подвижности в Д-МДП-структурах определяется их длинолокальной  $L_2$  областью; 3) величина подвижности электронов в инверсионных каналах МДП и Д-МДП-структур меньше объемной как при  $T=300$  К, так и при  $T=80$  К; 4) температурная зависимость подвижностей в исследованных структурах имеет максимум при низких концентрациях электронов в канале; 5) максимум зависимости подвижности электронов от температуры частично объясняется рассеянием носителей тока на ионах примеси и на колебаниях решетки.

В заключении необходимо отметить, что теоретические расчеты подвижностей носителей тока для инверсионных каналов проводятся по формулам, выведенными для объемных образцов полупроводников. Наблюдаемая разница между  $\mu_{рас.}(T)$  и  $\mu_{экс.}(T)$ , по-видимому, связана тем что при расчетах не учитывается ряд особенностей МДП-структур: 1) неточностью определения величины эффективной массы носителей тока в приповерхностном слое полупроводника при вырождении газа; 2) неточностью величины диэлектрической проницаемости, из-за разной степени поляризуемости поверхностного слоя и объема полупроводника.

[1] Ш.М. Гасанлы, Э.К. Гусейнов. Журнал тех. физики. 1995, т.65, в.12, с.139.

[2] Л.А. Коледов. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. Радио и связь, 1989, с.103.

[3] M.D. Pocha, R.W. Dutton. IEEE. J. of Solid-state circuits, 1975, n.5, p.322.

[4] F.F. Fang, A.B. Fowler. Phys. Rev, 1968, n.3, p.619.

[5] А.А. Гузев, Г.Л. Курьшев, С.П. Синица. ФТП, 1970, в.11, с.2043.

[6] Л.Н. Абессонова, В.Н. Добровольский. ФТП, 1976, в.4, с.605.

[7] Ш.М. Гасанлы, В.В. Голубев, В.Я. Кунин. Изв. вузов. Физика, 1980, №12, с.44.

[8] Ф.Дж. Блатт. Теория подвижности электронов в твердых телах. М.: 1963.

Ş.M. Həsənli, F.İ. Əliyev, X.B. Bayramov

## SİLİSİUM ƏSASLI D-MDP-STRUKTURLARININ İNVERSİON KANALLARINDA ELEKTRON YÜRÜKLÜYÜNÜN TƏDQIQI

İşdə MDP və D-MDP-strukturlarının inversion kanalında cərəyan keçiricilərinin elektrik xassələri tədqiq edilmişdir. Bu strukturlar kremniyum əsasında hazırlanmışdır. Göstərilmişdir ki, D-MDP strukturlarında ikiqat diffuziya: a) n-kanallı tranzistorların hazırlanmasına, b) inversion kanalının uzunluğunun 1-1,5 mkm-dək qısalmasına və bununla da diskret MDP-cihazlarının tezləşirliyinin artmasına və tezlik həddinin yüksəlməsinə imkan verir.

Əlavə olaraq göstərilmişdir ki, inversion kanalında elektronların yürüklüyü həm azot və həm də otaq temperaturlarında yarımqeçiricinin həcmindəki yürüklüyündən azdır və onun 1/4-1/5-ni təşkil edir. Tədqiq olunan strukturların yürüklüyünün temperaturdan asılılığında maksimum müşahidə edilmişdir ki, müşahidə olunmuş maksimum yük daşıyıcılarının aşqar ionlarda və qəfəs dalğalarında səpələnməsi ilə izah edilir.

Alınan nəticələrin analizi həm də D-MDP strukturlarının inversion kanalında elektronların keçiricilik və səpilmə proseslərinin mürəkkəb və özünəməxsus olduğunu göstərir.

Sh.M. Hasanli, F.I. Aliyev, Kh.B. Bayramov

## BEHAVIOUR OF ELECTRON MOBILITY IN INVERSION CHANNELS OF SILICON D-MDS-STRUCTURES

This paper deals with the investigation of behaviour of charge carriers in inversion channel of MDS-structures. There have been investigated D/MDS and MDS-structures on Si-based. It was shown that double diffusion in D/MDS-structures allows: a) to produce the induced n-channel transistor; b) to decrease the length of inversion channel up to 1-1,5 mkm and to increase the fast response of discrete MDS-devices.

It was shown that magnitude of electron mobility in inversion channels of MDS and D/MDS-structures is less than bulk ones as at  $T=300$  K as at  $T=80$  K, temperature dependence of mobilities in investigated structures has the maximum at low electron concentrations in channel, which is partially explained by charge carrier scattering on impurity ions and lattice vibrations.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИНВЕРСИОННЫХ КАНАЛАХ КРЕМНИЕВЫХ Д-МДШ-СТРУКТУР**

The analysis of obtained data indicates to complexity and features of conduction and electron scattering processes in inversion channel of D/MDS-structures and emphasizes properties of these structures.

*Дата поступления: 16.10.98*

*Редактор: З.И. Искендерзаде*