

ПЬЕЗОСОПРОТИВЛЕНИЕ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МДП ТРАНЗИСТОРОВ

Кочетов Ю. А., Макаров Е. А., Шадрин В. С.

Транзисторы со структурой металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) широко используются в современных полупроводниковых интегральных схемах (ИС). Малые геометрические размеры и высокая технологичность позволяют реализовать надежные БИС для различных областей техники. Исследование влияния деформации на вольтамперные характеристики (ВАХ) МДП транзисторов представляет интерес для разработки датчиков механических величин на МДП транзисторах [1, 2] и для оценки влияния механических воздействий на параметры МДП ИС [3]. Последние достижения в технологии сделали возможным создание МДП транзисторов с геометрическими размерами порядка 2 мкм и менее. Тензочувствительные свойства таких приборов не рассматривались.

Исследования пьезосопротивления в инверсионных каналах кремниевых МДП транзисторов проводились рядом авторов [3-6]. Показано, что тензор пьезосопротивления в инверсионном слое имеет пониженную степень симметрии [4], коэффициенты отличаются по величине от объемных и зависят от напряжений на затворе [5]. Эти эффекты объяснялись квантованием энергетического спектра электронов в приповерхностной области канала. Следует отметить большой разброс в абсолютных значениях коэффициентов, полученных различными авторами.

В данной работе обсуждаются результаты измерений пьезосопротивления *n*-канальных МДП транзисторов с различной длиной канала. Мы использовали транзисторы, применяемые в тестовых структурах для контроля параметров МДП БИС с длинами канала 2 и 40 мкм. Каналы были ориентированы в направлениях [100] и [110] соответственно. Образцы изготавливались вырезанием балок из кремниевых пластин на плоскости (001). Пьезосопротивление определялось как отношение относительного изменения δI_D тока стока I_D к механическому напряжению P , создаваемому нагружением консольно заземленной балки:

$$\pi = -\delta I_D / I_D P. \quad (1)$$

Знак минус связан с тем, что за положительное пьезосопротивление принимается, как обычно, увеличение сопротивления при растягивающей нагрузке. Измерения проводились в крутой и в пологой областях ВАХ.

На рис. 1 приведены результаты измерений продольного π_{11} и поперечного π_{12} коэффициентов пьезосопротивления транзистора с длиной канала 2 мкм в зависимости от напряжения на затворе U_G при комнатной температуре и температуре жидкого азота. На рис. 2 представлены аналогичные коэффициенты в зависимости от напряжения на стоке U_D совместно с продольной константой пьезосопротивления π'_{11} транзистора с длиной канала 40 мкм.

Уменьшение пьезосопротивления от U_G (рис. 1) связано с тем, что под действием электрического поля на поверхности электроны уже без деформации неравномерно перераспределены по долинам. В приближении треугольной потенциальной ямы энергия основных состояний системы подзон для долины i [7]

$$E_{0i} = (9\pi\hbar q E_{\perp} / 8)^{2/3} / (2m_{\perp i})^{1/3}, \quad (2)$$

где q — заряд электрона, \hbar — постоянная Планка, $m_{\perp i}$ — эффективная масса, перпендикулярная поверхности, E_{\perp} — перпендикулярное поверхности электрическое поле. При малом U_D

$$E_{\perp} = (U_G - U_{FB}) \epsilon_{SiO_2} \epsilon_{Si} d, \quad (3)$$

где ϵ_{SiO_2} , ϵ_{Si} — диэлектрические проницаемости SiO_2 и Si , $d = 700 \text{ \AA}$ — толщина диэлектрика, $U_{FB} = -0.4 \text{ В}$ — напряжение плоских зон. Разность энергий

основных состояний для долин [100] и [001] при $U_g=8$ В составляет около 50 мэВ. Влияние сильного поперечного электрического поля аналогично влиянию «большой» деформации, которая вызывает «перетекание» электронов между долинами и уменьшает влияние прикладываемого механического напряжения.

Отличие деформационных характеристик короткоканальных МДП транзисторов от длинноканальных заключается в зависимости коэффициентов пьезосопротивления от напряжения на стоке и меньшей температурной зависимости. Это связано с особенностями процессов переноса в коротком канале [8]. С увеличением U_D продольное электрическое поле в канале растет, электроны «разогреваются» до температур выше температуры решетки, дрейфовая скорость в канале насыщается. Авторами [9] показано, что в греющих электрических полях неэквивалентный разогрев электронов в долинах с разной эффективной массой приводит к анизотропии заселенности долин и уменьшению пьезосопротивления.

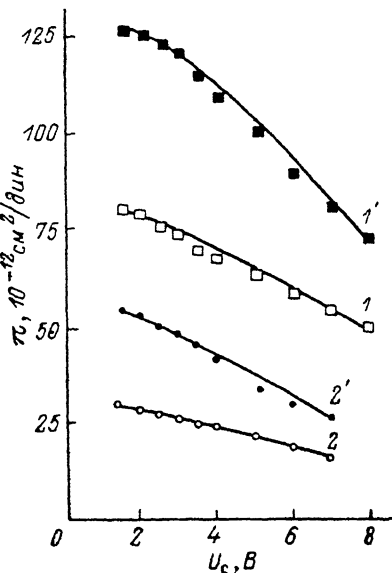


Рис. 1. Пьезосопротивление короткоканального МДП транзистора от напряжения на затворе.

Напряжение на стоке 0.5 В. 1, 1' — π_{11} ; 2, 2' — π_{12} . T, K: 1, 2 — 296; 1', 2' — 77.

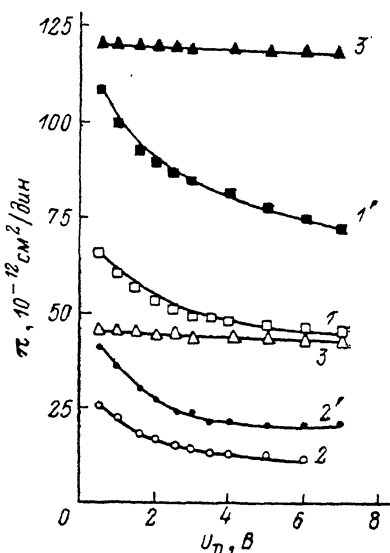


Рис. 2. Пьезосопротивление короткоканального и длинноканального МДП транзисторов от напряжения на стоке.

Напряжение на затворе 4В. 1, 1' — π_{11} ; 2, 2' — π_{12} ; 3, 3' — π'_{11} . T, K: 1-3 — 296; 1'-3' — 77.

тивления. С ростом поля этот механизм «перезаселения» становится преобладающим по сравнению с деформационным. Аналогичный эффект имеет место в короткоканальном транзисторе. С увеличением U_D часть канала, где электроны «разогреты», увеличивается, среднее поле в канале растет и пьезосопротивление уменьшается (рис. 2). В случае длинного канала этого не происходит, так как поле в большей части канала недостаточно для проявления эффектов сильного поля [8]. Оценить электронную температуру можно из уравнения баланса энергии [10]

$$qvE_1 = 3k_B(T_e - T)/2\tau_E, \quad (4)$$

где τ_E — время релаксации энергии, v — дрейфовая скорость, k_B — постоянная Больцмана, E_1 — продольное электрическое поле, T и T_e — температуры решетки и электронов соответственно. Точные расчеты показывают, что τ_E в широком интервале полей и температур не меняется и приближенно равно 0.5 пс. Электронные температуры в точке канала, где продольное поле порядка 10^4 В/см и скорость насыщается до 10^7 см/с для комнатной температуры и температуры жидкого азота, составят соответственно 680 и 460 К. Отношение электронных температур меньше, чем отношение температур решетки, что уменьшает температурную зависимость.

Таким образом, зависимость коэффициентов пьезосопротивления короткоканальных МДП транзисторов от напряжения на стоке и меньшая температурная зависимость могут быть объяснены эффектами разогрева электронного газа в канале.

Список литературы

- [1] Tanigawa H., Ishihara T., Hirata M., Suzuki K. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1985. V. 32. N 7. P. 1191.
- [2] Круглов В. В., Макаров Е. А., Мельниченко В. А. // Приборы и системы управления. 1981. № 1. С. 23.
- [3] Mikoshiba H. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 3. P. 221.
- [4] Colman D., Bate R. T., Mize J. P. // Appl. Phys. 1968. V. 39. N 4. P. 1923.
- [5] Dorda G. // Appl. Phys. 1971. V. 42. N 5. P. 2053.
- [6] Zaima S., Yasuda Y., Kawaguchi S. et al. // Appl. Phys. 1986. V. 60. N 11. P. 3959—3966.
- [7] Аядо Т., Фаулер А., Стерн Ф. Электронные свойства двумерных систем. М., 1985. 416 с.
- [8] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. М., 1984. 456 с.
- [9] Барановский С. Н., Солодков В. Д. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 10. С. 1938.
- [10] Hansch W., Miura-Mattausch M. // Appl. Phys. 1986. V. 60. N 2. P. 650—656.

Новосибирский
электротехнический институт

Получено 20.04.1989
Принято к печати 29.05.1989

ФТП, том 23, вып. 10, 1989

ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ, ВВЕДЕННЫХ В $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ И ЭЛЕКТРОНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ, НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Кольцов Г. И., Юрчук С. Ю.

При конструировании и создании фоточувствительных структур, работающих в заданном спектральном диапазоне, необходимо учитывать появление в полупроводниковых материалах глубоких центров (ГЦ), изменяющих электрофизические характеристики материала: подвижность и время жизни носителей заряда, а следовательно, и спектральную чувствительность. При работе фотодиода в вольтаическом режиме спектральные характеристики определяются эффективностью собирания носителей заряда, генерированных у поверхности, в области пространственного заряда и в базе диода, поэтому изменение времени жизни в любой из областей приведет к изменению спектральной фоточувствительности.

Для сравнения на рис. 1 представлены спектры фоточувствительности p^+ — n -переходов, изготовленных ионной имплантацией Be^+ в $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ n -типа с исходной концентрацией электронов $1 \cdot 10^{16}$ — $1 \cdot 10^{17}$ см^{-3} , выращенном на подложке GaAs n -типа с концентрацией электронов $5 \cdot 10^{18}$ см^{-3} [1], диодов Шоттки, полученных вакуумным напылением серебра на тот же исходный $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, и рассчитанная на ЭВМ характеристика спектральной фоточувствительности для той же глубины залегания p^+ — n -перехода (~ 1 мкм), как и у изготовленных p^+ — n -структур. В теоретических расчетах было показано, что определяющими факторами, влияющими на спектральную характеристику фотодиода, являются время жизни носителей заряда в n - и p -областях структуры и глубина залегания перехода, а изменение скорости поверхностной рекомбинации незначительно сдвигает коротковолновую границу фоточувствительности.

Как видно из рис. 1, теоретическая кривая при таких параметрах расчета близка к экспериментальной и обе они значительно отличаются от эксперимен-