

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНЖЕКЦИИ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЗАТВОРА КМДП СТРУКТУР

¹Черкесова Н.В.*, ¹Мустафаев Г.А., ²Мустафаев А.Г.

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства

*natasha07_2002@mail.ru

Разработана технология формирования КМДП структур, в котором оба типа полевых транзисторов имеют p^+ -легирование поликремниевых электродов затвора. Проведено исследование предпороговых характеристик и ВАХ стока для полевых транзисторов со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния и зависимости тока стока и динамической проводимости от длины канала полевых транзисторов со скрытым n -каналом. Показано, что эти приборы характеризуются снижением порогового напряжения при уменьшении толщины окисла затвора от 17,5 до 11 нм и возрастанием динамической проводимости. Показано, что высокие значения эффективной подвижности электронов, тока стока в насыщении и динамической подвижности для полевых транзисторов со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния обусловлены уменьшением рассеяния электронов на поверхности раздела Si/SiO_2 , а небольшое увеличение глубины пика поля в структуре полевых транзисторов уменьшает скорость деградации под воздействием горячих электронов, инжектируемых через поверхность раздела Si/SiO_2 .

Ключевые слова: имплантация примесей, поликремний, эффекты короткого канала, концентрация примеси, инъекции горячих носителей, изолирующий слой, динамическая проводимость, пороговое напряжение, длина канала.

REDUCING THE EFFECT OF INJECTION OF HOT CARRIERS BY ACCEPTOR ALLOYING OF POLYSILICON GATE ELECTRODES OF THE MIS STRUCTURES

¹Cherkesova N.V., ¹Mustafaev G.A., ²Mustafaev A.G.

¹Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

²Dagestan State University of National Economy

A technique for forming CMIS structures has been devised, in which both types of field-effect transistors contain polysilicon gate electrodes doped with p^+ -doping. The pre-threshold and flow characteristics of field-effect transistors with a hidden n -channel and a gate made of p^+ -polysilicon were investigated, as well as the dependence of the drain current and dynamic conductivity on the channel length of field-effect transistors with a hidden n -channel. It is demonstrated that these devices have a lower threshold voltage as the thickness of the gate oxide is reduced from 17.5 to 11 nm, as well as an improvement in dynamic conductivity. It is demonstrated that the high values of effective electron mobility, saturation drain current, and dynamic mobility for field-effect transistors with a hidden n -channel and a gate made of p^+ -polysilicon are due to a decrease in electron scattering at the Si/SiO_2 interface, and a slight increase in the depth of the field peak in the structure of field-effect transistors reduces the rate of degradation under the influence of hot electrons injected through the Si/SiO_2 interface.

Keywords: implantation process, polysilicone, short-channel effect, dopant concentration, hot-carrier injection, insulating course, dynamic conductivity, voltage threshold, channel length.

Введение

Многие технологии КМДП ИС с субмикронными размерами элементов используют легирование поликремния в процессе имплантации для создания областей истока/стока, т. е. n^+ -легирование для n -канальных полевых транзисторов (ПТ) и p^+ -легирование для p -канальных ПТ [1–4]. Это позволяет компенсировать эффекты короткого канала (для p -канальных ПТ), однако, создает ряд технологических сложностей. Во-первых, из-за различия значений работы выхода для двух типов ПТ приходится также различным образом проводить имплантацию примесей для коррекции пороговых напряжений; вдобавок, по меньшей мере для одной из этих операций необходимо предварительно формировать маску. Во-вторых, легирование электрода затвора одновременно с областями истока/стока неудобно в том отношении, что для активных областей требуется малая глубина перехода, а для затвора необходима максимальная концентрация примеси на поверхности раздела с диэлектриком, чтобы в дальнейшем исключить обеднение поликремния и снижение тока истока. С уменьшением длины затвора это расхождение становится все более выраженным. Нередко эту проблему решают путем уменьшения толщины слоя поликремния для создания затворов, но в результате уменьшается также толщина слоя окисла на боковой поверхности электродов затвора и ухудшаются возможности формирования слаболегированного переходного участка стока, для ослабления инжекции горячих носителей [5–7].

Результаты и обсуждение

В работе исследован вариант технологии КМДП ИС, в котором оба типа ПТ имеют p^+ -легирование поликремниевых электродов затвора. При этом используются преимущества ПТ с поверхностным p -каналом и исключаются проблемы, обсуждавшиеся выше. В результате p^+ -легирования поликремниевых затворов создаются ПТ со скрытым n -каналом, чувствительные к эффектам короткого канала; однако эти эффекты легче компенсировать, чем в случае ПТ со скрытым p -каналом – имплантация ионов As и Sb для создания мелкозалегающих переходов истока/стока и коррекции порогового напряжения осуществляется проще, чем имплантация бора В [8]. В работе исследованы преимущества процесса p^+ -легирования без использования маски для создания приборов с длиной затворов 0,5 мкм.

Экспериментальная технология КМДП ИС предусматривает создание n - и p -карманов с поверхностной концентрацией примесей в области канала $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; изоляция приборов обеспечивается по методу локального окисления [4]. Перед выращиванием окисла затвора, чтобы исключить радиационные дефекты, проводят имплантацию As (10 кВ) либо Sb (12 кВ) с дозами $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для задания порогового напряжения. При этом, согласно данным моделирования по программе SUPREMO, глубина перехода между формируемым таким образом слоем и p -карманом определяется в основном диффузией примеси на этапе поверхностного окисления электрода затвора и для обеих названных примесей составляет 30 нм. После выращивания толстого слоя полевого окисла проводят имплантацию бора В (180 кВ, 4×10^{12} либо $8 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$) для создания стоп – области. Толщину слоя окисла затвора варьировали от 11,0 до 17,5 нм. Слой поликремния толщиной 0,35 мкм легируют бором В с дозой 10^{16} см^{-2} до операции литографии для формирования электродов затвора. Для создания слаболегированных переходных участков истока/стока проводят имплантацию фосфора Р (20 кВ) и бора В (10 кВ) с дозами 10^{13} см^{-2} [2].

Проверены два варианта структур – с обычным окислом толщиной 200 нм на боковой поверхности электрода и слоем поликремния толщиной 100 нм, который дополняется слоем окисла той же толщины. Перед травлением слой поликремния для создания изоляции на боковой поверхности электродов легируют путем имплантации бора В. Этот изолирующий слой на 100 нм увеличивает перекрытие областей истока/стока электродом затвора при имплантации. Сильнолегированные области истока-стока формируют путем имплантации As (60 кВ) либо В (10 кВ). Единственной существенной термообработкой после поверхностного окисления электродов затвора является операция быстрого термического отжига, при 1050 °С в течение 5 с. Малое суммарное воздействие высоких температур необходимо для предотвращения диффузии бора В через тонкий окисел затвора; отсутствие такой диффузии установлено при проверке вариаций порогового напряжения с толщиной окисла затвора.

Экспериментальные приборы, имеющие затворы из p^+ -поликремния (примесь – В), и контрольные приборы, имеющие затворы из n^+ -поликремния (примесь – Р), характеризуются снижением порогового напряжения на 200 мВ при уменьшении толщины окисла затвора от 17,5 до 11 нм. Диффузия бора В через окисел затвора в случае приборов с затвором из p^+ -поликремния должна привести к более сильному снижению порогового напряжения. На кривых ВФХ не обнаружены какие-либо проявления обеднения в поликремнии. При напряжении обратного смещения 5 В утечки между переходами (исток/сток) и приборными карманами составляют всего 1–5 нА/см², что указывает на существенно полный отжиг дефектов после имплантации примесей.

Контакты приборов создавали с помощью формирования слоев силицида титана $TiSi_2$ и «пробок» из вольфрама W, также с малым термическим воздействием [9, 10]. Размеры определяли с помощью растрового электронного микроскопа на шлифах приборных структур. Электрическая длина канала ПТ при этом считается близкой к длине электрода, ввиду малых доз при создании слабелегированных переходных участков стока и минимального термического воздействия при создании областей истока/стока.

На рис. 1 показаны предпороговые характеристики (а) и ВАХ стока (б) для ПТ со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния, с длиной электрода затвора 0,35 мкм. При напряжении питания 5 В достигается ток насыщения – 700 мкА/мкм. Даже при столь малой длине затвора эффекты короткого канала незначительны, что и обеспечило возможность работы прибора при напряжении питания 5 В. Эти приборы характеризуются снижением порогового напряжения при уменьшении толщины окисла затвора от 17,5 до 11 нм; а динамическая проводимость возрастает. Измеренная величина подвижности электронов в скрытом канале составила 650 см²/В с; для контрольных ПТ с поверхностным каналом и затвором из n^+ -поликремния этот параметр равен 550 см²/В с.

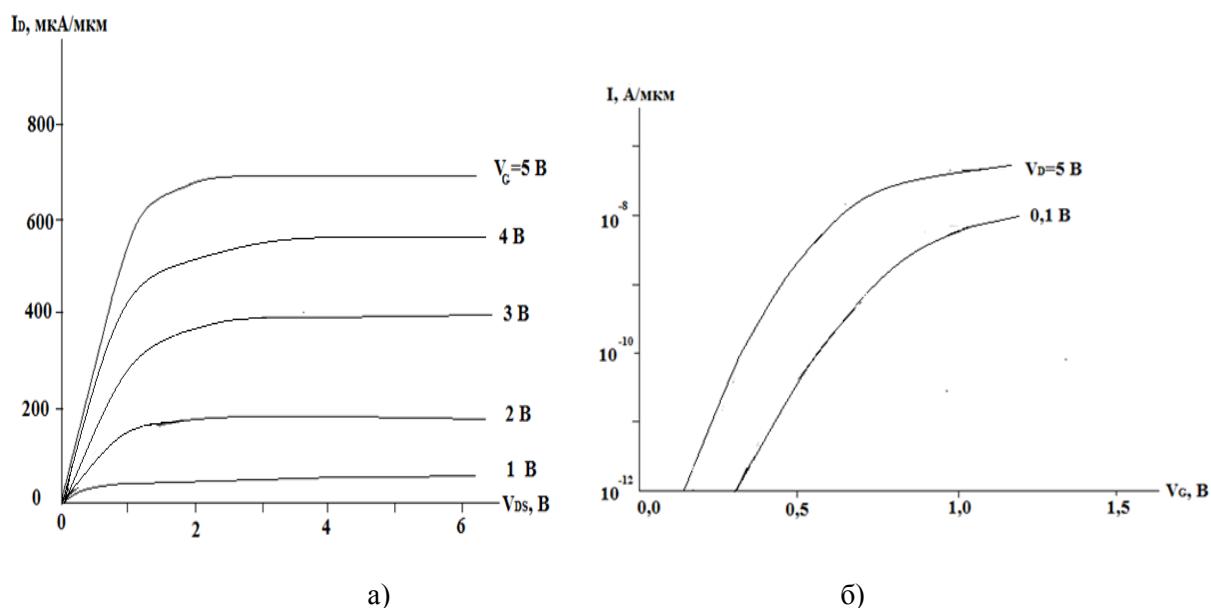


Рис. 1. Предпороговые характеристики (а) и ВАХ стока (б) для ПТ со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния

На рис. 2 показаны зависимости тока стока при насыщении и динамической проводимости от длины канала в ПТ со скрытым n -каналом. Видно, что при длине затвора менее 0,5 мкм ток стока снижается быстрее, что обусловлено более ранним снижением порогового напряжения в приборах с коротким каналом и малой дозой легирования стоп-области. В приборах с большой длиной канала пик концентрации примеси в стоп-области располагается существенно глубже слоя канала и менее слабо влияет на величину рабочего тока.

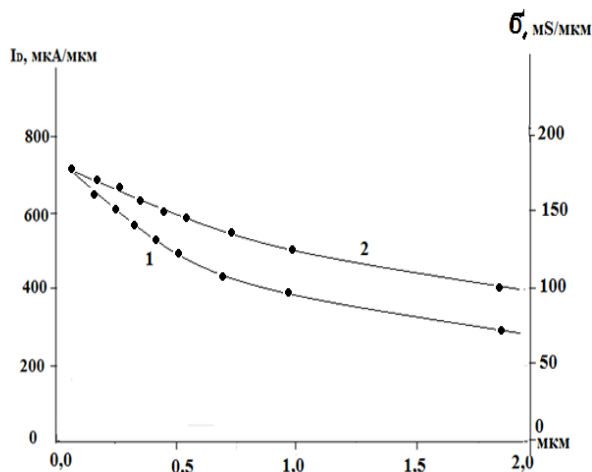


Рис. 2. Зависимости тока стока (1) и динамической проводимости (2) от длины канала в ПТ со скрытым n-каналом

На рис. 3 показаны, зависимости размаха напряжения для предпороговой области (1) при напряжении питания 5 В и порогового напряжения (2) от длины затвора в ПТ со скрытым n-каналом; при длине затвора 0,38 мкм, предпороговые характеристики резко ухудшаются.

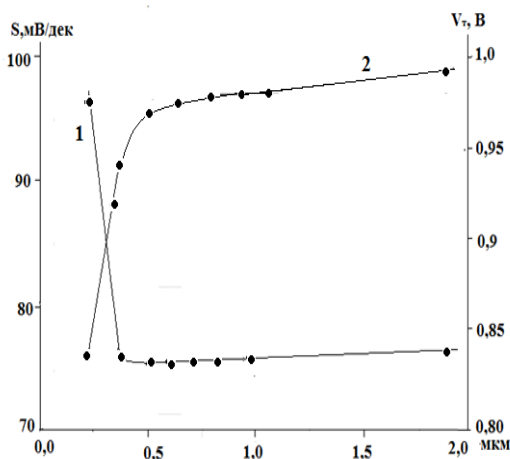


Рис. 3. Зависимости размаха напряжения для предпороговой области (1) и порогового напряжения (2) от длины затвора в ПТ со скрытым n-каналом

Изготовленные образцы ПТ с поверхностным p-каналом имеют обычные характеристики, с хорошо контролируруемыми эффектами короткого канала. Измеренная на тестовых структурах подвижность носителей в канале составляет $125 \text{ см}^2/\text{В с}$, контрольные приборы со скрытым каналом имеют подвижность носителей $225 \text{ см}^2/\text{В с}$.

Высокие значения эффективной подвижности электронов, тока стока в насыщении и динамической подвижности для экспериментальных ПТ со скрытым n-каналом и затвором из p^+ -поликремния можно объяснить уменьшением рассеяния электронов на поверхности раздела Si/SiO_2 . Хотя приповерхностная плотность электронов сначала возрастает с напряжением V_{GS} , однако, если V_{GS} превышает пороговое напряжение на 1 В, то пик плотности электронов находится на поверхности. В ПТ со скрытым каналом поперечное электрическое поле слабее, чем в ПТ с поверхностным каналом, при одинаковых условиях смещения, и это может быть причиной возрастания эффективной подвижности электронов. Напротив, относительно низкую эффективную подвижность дырок в ПТ с поверхностным p-каналом можно объяснить более сильным поперечным полем в области канала, чем в структуре со скрытым каналом. Подвижность носителей ухудшается также в результате сильного поверхностного легирования ($5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) в сочетании с неглубокой имплантацией примеси для задания порогового напряжения.

Возможный недостаток процесса изготовления КМДП структур с затворами из p^+ -поликремния состоит в увеличенной асимметрии рабочих токов между n - и p -канальными ПТ. Однако такая асимметрия может найти применение в некоторых логических схемах [2].

Слабое проявление эффектов короткого канала (см. рис. 1 и 3) свидетельствует о возможности контроля этих эффектов, при условии неглубокой имплантации примеси для задания порогового напряжения в сочетании с правильным выбором дозы для создания стоп-области. Сравнительно несложно выполнить неглубокую имплантацию As либо Sb при формировании структур с затвором из p^+ -поликремния – то, что с трудом достигается с помощью имплантации бора В при формировании структур ПТ с затвором из n^+ -поликремния.

Пиковая напряженность поля в области отсечки для ПТ со скрытым каналом при условии насыщения располагается глубже, чем в соответствующей структуре ПТ с поверхностным каналом. Поскольку средняя длина свободного пробега электронов с большой энергией, генерируемых в области пика поля, составляет всего 10–20 нм, небольшое увеличение глубины пика поля в структуре ПТ может существенно уменьшить скорость деградации под воздействием горячих электронов, инжектируемых через поверхность раздела Si/SiO₂ [5–7]. Этим и объясняется стабильность изготовленных образцов ПТ со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния. Деградация снижается благодаря применению тонкого слоя поликремния в боковой изоляции электродов затвора, что обеспечивает уменьшение пикового напряжения и тока в подложку, в сочетании с повышением напряжения обратного пробоя. Дополнительный выигрыш от тонкого слоя поликремния в структуре боковой изоляции электродов затвора состоит в улучшении управляемости заполнением быстрых поверхностных состояний (от радиационных дефектов), снижении их способности обеднять нижележащую n^- -область и ухудшать токовые характеристики прибора. Комбинация скрытого n -канала и дополнительного слоя поликремния в структуре боковой изоляции на электроде затвора из p^+ -поликремния позволяет создавать МДП ПТ с длиной затвора менее 0,5 мкм, способные работать в наихудших условиях смещения при напряжении питания 5 В и при столь малой длине затвора эффекты короткого канала незначительны

Выводы

Проведено исследование предпороговых характеристик и ВАХ стока для полевых транзисторов со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния, тока стока и динамической проводимости от длины канала полевых транзисторов со скрытым n -каналом, а также размах напряжения для предпороговой области и порогового напряжения от длины затвора в ПТ со скрытым n -каналом. Показано, что эти приборы характеризуются снижением порогового напряжения при уменьшении толщины окисла затвора, а высокие значения эффективной подвижности электронов, тока стока в насыщении и динамической подвижности для полевых транзисторов со скрытым n -каналом и затвором из p^+ -поликремния обусловлены уменьшением рассеяния электронов на поверхности раздела Si/SiO₂. Показано, что при длине затвора менее 0,5 мкм эффекты короткого канала незначительны, ток стока снижается быстрее, что обусловлено более ранним снижением порогового напряжения в приборах с коротким каналом и малой дозой легирования стоп-области, а в приборах с большой длиной канала пик концентрации примеси в стоп-области располагается существенно глубже слоя канала и менее слабо влияет на величину рабочего тока, а небольшое увеличение глубины пика поля в структуре полевых транзисторов уменьшает скорость деградации под воздействием горячих электронов, инжектируемых через поверхность раздела Si/SiO₂.

Библиография

1. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.
2. Мустафаев Г.А, Черкесова Н.В. Проектирование элементов цифровых МДП-схем устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов: учебное пособие. Нальчик, 2020. 95 с.
3. Зятьков И.И. Базовые процессы планарной технологии [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие. 2018. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
4. Зи С. Технология СБИС. М.: Мир, 1986. 404 с.

5. Takeda E., Suzuki N., Hagiwara T. Device Performance Degradation to Hot-Carrier Injection at Energies Below the Si-SiO₂ Energy Barrier // Proc. Intl. Electron Devices Meeting. 1983. P. 396–399.
6. Guerin C., Huard V., Bravaix A. The Energy-Driven Hot-Carrier Degradation Modes of nMOSFETs IEEE // Transactions on Device and Materials Reliability. 2007. V. 7, N 2. P. 225–235.
7. Ioannou D.P., Ioannou D.E. Some issues of hot-carrier degradation and negative bias temperature instability of advanced SOI CMOS transistors // Solid State Electron. 2007. V. 51, N 2. P. 268–277.
8. Патент РФ № 2757539. Способ изготовления мелкозалегающих переходов / Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Черкесова Н.В., Мустафаев А.Г.
9. Черкесова Н.В., Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г. Исследование возможности снижения сопротивления контактов и межсоединений формированием двухслойных W/WSi_x электродов затвора // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. Т. 13, № 3. С. 55–58.
10. Патент РФ № 2757177. Способ изготовления полупроводникового прибора с многослойными проводниками / Мустафаев Г.А., Хасанов А.И., Мустафаев А.Г., Черкесова Н.В., Мустафаев А.Г. Оpubл. 11.10.2021 г. Бюл. № 29.