

К. т. н. С. П. НОВОСЯДЛЫЙ, д. ф.-м. н. Я. С. БУДЖАК

Украина, г. Ивано-Франковск, СКТБ «Оризон»;
г. Львов, Гос. ун-т «Львівська політехніка»

Дата поступления в редакцию
30.05 1997 г. — 27.03 1998 г.
Оппонент к. т. н. П. П. СТЕШЕНКО

ЮСТИРОВКА ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ БИС

На основе H-MOS-технологии разработаны новые методы контроля малых доз ионного легирования в системной технологии микроэлектроники.

Based on H-MOS technology the process control inspection new methods of dosage concentration of doping in system technology of microelectronics have been developed.

Задача бездефектного проектирования БИС на МОП-транзисторах с использованием высококачественной технологии ионного легирования требует разработки прогрессивных методов юстировки пороговых напряжений. В свою очередь, высокая точность подгонки пороговых напряжений требует разработки экспрессных методов контроля малых доз ионного легирования и α -облучения.

Существуют различные методы подгонки пороговых напряжений, в т. ч. радиационная технология ионного легирования и α -облучения (структуры H-MOS-типа). При этом очень важным для юстировки пороговых напряжений становится разработка способов прецизионного дозирования вводимой примеси и ее контроль в процессе ионного легирования для установления определенных уровней пороговых напряжений.

Кроме того, для улучшения электрических характеристик МОП-транзисторов, их быстродействия, уменьшения энергопотребления, повышения надежности, уменьшения дефектности и площади кристаллов БИС при их проектировании широко используется масштабирование структуры [1, 2]. Такое масштабирование структур БИС также требует прецизионного ионного легирования — как по дозе, так и по энергии вводимых ионов.

Ниже приведены разработанные способы подгонки пороговых напряжений и методы контроля малых доз ионного легирования в технологии изготовления БИС.

Использование трехфтористого бора для формирования областей К-МОП-структур

Благодаря большому радиусу ионов BF_3 изотопа ^{10}B коэффициент диффузии таких ионов уменьшается на порядок, что позволяет формировать $p-n$ -переходы на небольших глубинах.

Имплантиция ионов бора в кремниевые пластины КЭФ 4.5 (100) проводилась на установках «Везувий-5» с использованием источников ионов ОТМЗ.152.021. Энергия ионов выбиралась в пределах 20 — 75 кэВ при дозах легирования 0,04...1, 20...60 и 250...750 мкКл/см². Отжиг имплантированной примеси проводили при 950 — 1200°С в атмосфере сухого кислорода, влажного кислорода и азота [3].

Результаты исследований позволили использовать процесс ионного легирования (ИЛ) для подгонки пороговых напряжений при малых дозах и для формирования сток-истоковых областей К-МОП-структур.

Проведенные исследования дали возможность проследить за характеристикой распределения примесей в структурах кремния в зависимости от дозы и энергии легирования, температуры и времени диффузии, а также исследовать температурно-временные зависимости поверхностного сопротивления диффузионных слоев от дозы ИЛ для разных режимов разгонки. При этом толщина маскирующего окисла снижается с 0,65 до 0,3 мкм, а поверхностное сопротивление ионно-имплантированных слоев определяется дозой легирования и составляет 70 — 10000 Ом/□.

Экспресс-контроль ионного легирования B^+ и P^+ малыми дозами

Разработан метод экспресс-контроля с помощью измерений проводимости канала МОП-транзистора [4]. Для этого используется специальная тестовая структура, которая формируется фотошаблонами сток-истоковых областей и канала между ними.

Энергия введенной примеси изменялась от 20 до 100 кэВ, а доза — от 0,04 до 0,25 мкКл/см². В роли подложки использовались кремниевые пластины КДБ-80 (100), КДБ-10 (100), КЭФ 4.5 (100).

Измерение проводимости канала (D) осуществлялось согласно выражению

$$D = AR_s^{-b}; \quad (1)$$

$$A = D_1 R_{s1}^b; \quad b = \frac{\ln(D_2/D_1)}{\ln(R_{s1}/R_{s2})},$$

где R_s — сопротивление канала;

D_1, D_2 — дозы ионного легирования, определяющие поверхностные сопротивления R_{s1}, R_{s2} ;

b, A — коэффициенты, которые определяются из экспериментальных данных.

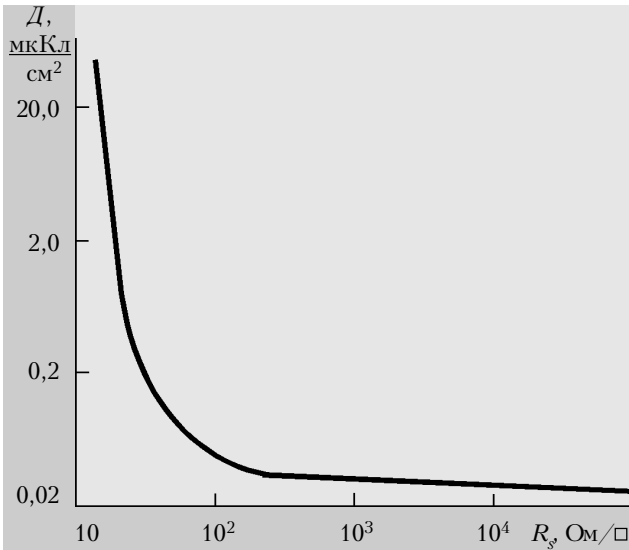


Рис. 1. Зависимость дозы ионного легирования от сопротивления канала МОП-транзистора

Так как сопротивление канала равно

$$R = (L/w)R_s, \quad (2)$$

то необходимая доза ионного легирования определяется числом квадратов канала (L/w) и его сопротивлением:

$$D = A(Rw/L)^{-b}. \quad (3)$$

Измеряя сопротивление (проводимость) канала, определяют соответствующую ему дозу ионного легирования V^+ или P^+ , используя при этом корреляционный график зависимости $D=f(R_s)$ для конкретных значений энергии ионов V^+ или P^+ (рис. 1).

Определение малых доз ионного легирования по импульсным ВФХ тестовой структуры

В роли рабочих пластин использовались контрольные пластины КДБ-80 (100) с тестовыми структурами (ТС). Для наблюдения четких минимумов емкости на вольт-фарадных характеристиках эти тестовые структуры предварительно легировали ион-

ной имплантацией примеси с n -типом проводимости. Вместе с партией Si-пластин контрольные пластины с ТС проходили операции химической обработки, окисления под затвор до толщины $>100 \text{ \AA}$ ионного легирования фосфором P^+ дозой $0,15 \text{ мкКл/см}^2$ и энергией 100 кэВ , при этом часть ТС экранировалась от ионного легирования.

На контрольных пластинах проводили отжиг-стабилизацию при 900°C с использованием фосфорно-силикатного стекла из источника POCl_3 (такой режим устраняет разброс значений в окисле). Затем на нелегированной и легированной контролируемой дозой ТС проводилось измерение неравновесных импульсных ВФХ со скоростью развертки (треугольного или трапецеидального) напряжения $10^5 - 10^6 \text{ В/с}$ [5]. Для обеспечения смещения поверхности кремния в состояние инверсии (обеднение) использовался дополнительный источник постоянного напряжения. Напряжение смещения ВФХ на ТС находилось в пределах $2,9 - 3,1 \text{ В}$.

Необходимую дозу ионного легирования определяли из выражения

$$D = \Delta U C_{ок} / q = f(\Delta U), \quad (4)$$

где ΔU — величина сдвига порогового напряжения на легированной и нелегированной частях ТС;

$C_{ок}$ — удельная емкость подзатворного диэлектрика;
 q — заряд электрона.

На рис. 2 представлены неравновесные ВФХ тестовых структур с использованием предварительного ионного легирования примесью с концентрацией, близкой к концентрации кремниевой подложки (а), и с концентрацией, намного большей концентрации примеси в подложке (б), где 1 и 2 — ВФХ, измеренные соответственно на легированной и нелегированной контролируемой примесью части ТС.

Таким образом, зависимость малой дозы ионного легирования от сдвига порогового напряжения $D=f(\Delta U)$ имеет линейный характер для определенного значения энергии ионов, и нет необходимости в измерении зарядового состояния на межфазной границе $\text{Si} - \text{SiO}_2$.

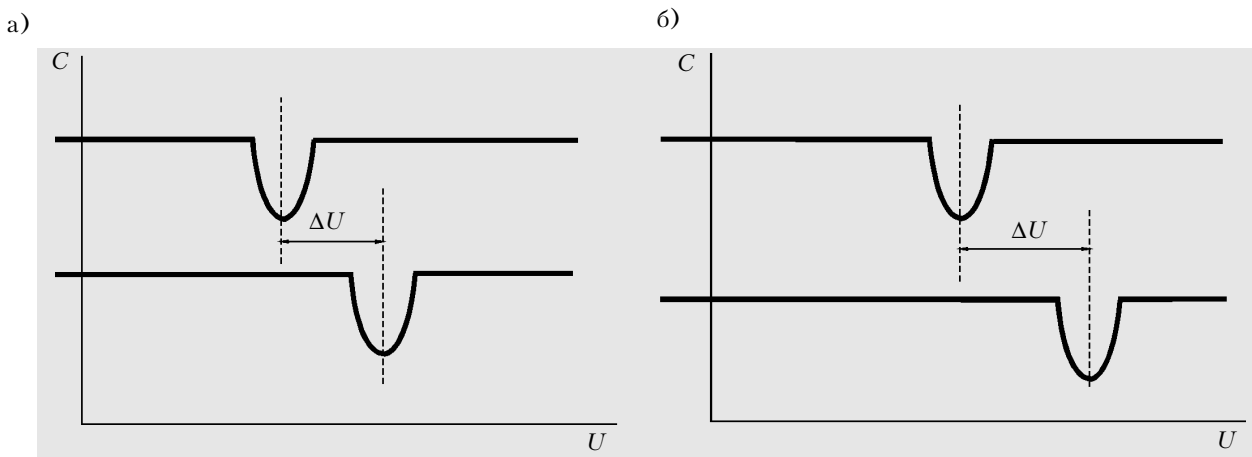


Рис. 2. Неравновесные вольт-фарадные импульсные характеристики тестовых структур для определения малых доз ионного легирования

Способ подгонки тонкопленочных резисторов

Для изготовления прецизионных ИС при формировании резисторов используют тонкопленочную технологию на основе тантала, поликремния или керметных материалов [6 и др.]. Такие резистивные слои формируют поверх межслойной изоляции перед металлизацией ИС.

Для изменения величины сопротивления таких резисторов (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения) с улучшением стабильности их ТКС подгонку проводят ионным легированием примеси до концентрации 0,01 – 30 ат. % из элементов Ib, IIb, III, IV, V, VIII групп Периодической системы. После ионного легирования проводится соответствующий отжиг при 150 – 300°C в атмосфере воздуха или кислорода.

Уникальность данной технологии состоит в возможности создания резисторов с положительными или отрицательными значениями ТКС.

Экспресс-контроль малых доз ионного легирования по изменению параметров фоторезистивной пленки

Метод базируется на использовании зависимости электрофизических параметров пленки фоторезиста от величины и энергии ионного пучка [7], что позволяет с высокой точностью определять дозу ионного легирования примеси в структурах БИС для подгонки пороговых напряжений МОП-транзисторов, электрических параметров тонкопленочных резисторов и конденсаторов.

В процессе облучения резиста дозой ионного легирования происходит перегруппировка молекул или сшивка их. Это приводит к изменению параметров резистивной пленки:

- скорость растворения уменьшается;
- адгезия к Si-подложке увеличивается;
- диэлектрическая постоянная увеличивается;
- коэффициент преломления уменьшается;
- плазmostойкость увеличивается;
- коэффициент пропускания уменьшается.

Используя нормированные графики зависимости электрофизических параметров пленки резиста от дозы и энергии ионного легирования, по тестовой структуре определяют малую дозу в пределах 0,05 – 10 мкКл/см².

Модифицированный четырехзондовый метод контроля малых доз

Метод состоит в использовании зависимости удельного сопротивления от плотности радиационных дефектов [8], которые образуются ионно-имплантированными примесями определенной дозы.

Используются контрольные пластины-спутники рабочих партий КЭФ 4.5 (100) или КДБ 45 (100) соответственно для легирующих примесей P⁺ и As⁺ или V⁺. При этом для получения воспроизводимых результатов необходимо исключить влияние необлученного слоя, толщина которого больше толщины удвоенного слоя ионного легирования.

Контроль дозы ионного легирования осуществляется в два этапа с помощью измерения поверхностного сопротивления четырехзондовым методом. На первом этапе сравнительно большую дозу D₁ (10 – 50 мкКл/см²) имплантируют в Si-подложку термоотжигом для образования p – n-перехода на относительно небольшой глубине (0,5 – 0,8 мкм) с определением соответствующего поверхностного сопротивления R_{s1}.

Второй этап представляет собой определение малой дозы D₂ (0,05 – 0,5 мкКл/см²) и включает в себя имплантацию примеси уже дозой D₂ в подготовленную Si-подложку, предварительно легированную дозой D₁. Поверхностное сопротивление R_{s2} измеряется без проведения термоотжига (с образованием радиационных дефектов). При малых дозах ионного легирования плотность образованных радиационных дефектов пропорциональна дозе облучения. Поэтому на данном этапе определяют изменение поверхностного сопротивления ΔR_s = R_{s2} – R_{s1},

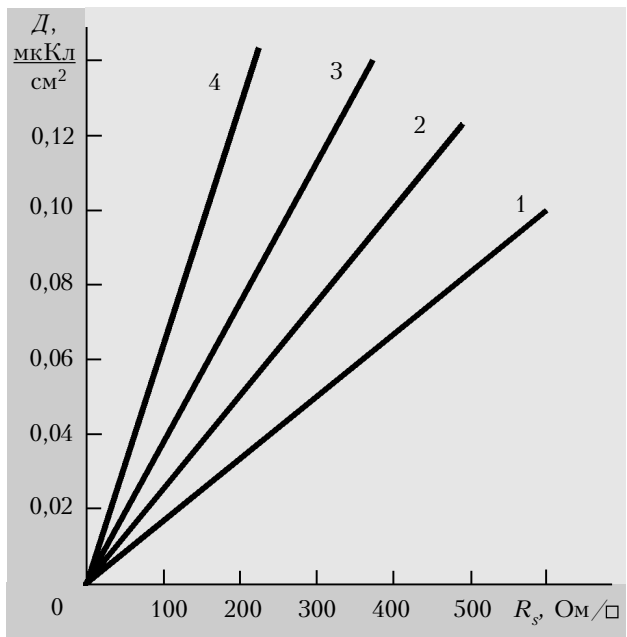


Рис. 3. Зависимость дозы ионного легирования от изменения поверхностного сопротивления ионно-имплантированного слоя:

1 – D₁^I=15 мкКл/см²; 2 – D₁^{II}=20; 3 – D₁^{III}=25; 4 – D₁^{IV}=50 мкКл/см²

а удельное сопротивление облученного слоя кремния будет линейно увеличиваться с ростом дозы ионного легирования D₂.

Для получения высокой чувствительности и высокой воспроизводимости результатов необходимо, чтобы E₁ превышало E₂ на 10 – 20%, а доза ионного легирования D₁ превышала D₂ на два порядка. Малую дозу ионного легирования определяют из нормированного графика D = f(ΔR_s), который представлен на рис. 3.

Следует отметить высокую технологичность использования тестовой структуры Кельвина для измерения поверхностного сопротивления.

Определение малой дозы ионного легирования по току стока МОП-транзистора комплементарной пары

В структурах кристаллов БИС очень часто используется комплементарная пара МОП-транзисторов обогащенного и обедненного типов. Такие МОП-транзисторы имеют единый технологический цикл изготовления, а для транзистора обедненного типа проводится дополнительная имплантация при формировании встроенного канала. Как правило, при изготовлении структуры БИС обогащенные транзисторы используют в роли входных (ключевых), а обедненные — в роли нагрузочных.

При определении малых доз ионного легирования используется зависимость тока стока I_c МОП-транзистора обедненного типа от порогового напряжения U_T МОП-транзистора обогащенного типа, которая представляет собой линейную зависимость от дозы ионного легирования в виде

$$I_c = (w/L) \cdot \mu_p C_{ок} (U_{отс}^2 \pm 2U_{отс} U_T) \quad (5)$$

При использовании тестовой структуры с параметрами $w/L=1$, $\mu_p=280 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $C_{ок}=2,88 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}/\text{см}^2$

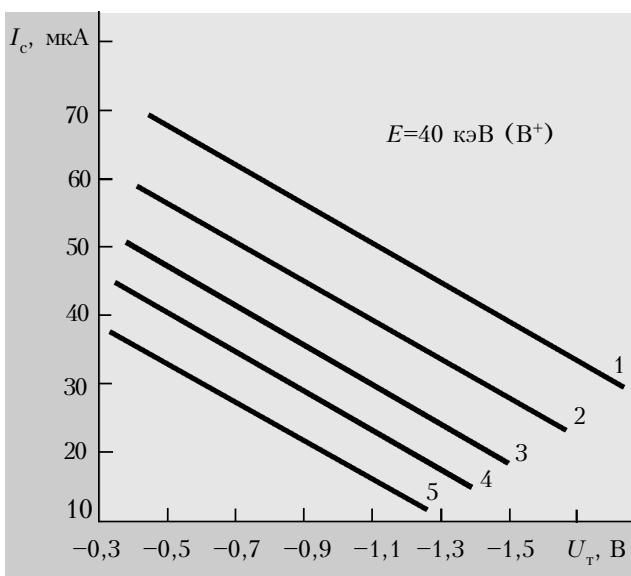


Рис. 4. Зависимость тока стока обедненного МОП-транзистора от порогового напряжения обогащенного транзистора комплементарной пары:

1 — $D_1=0,110 \text{ мкКл}/\text{см}^2$; 2 — 0,105; 3 — 0,1;
4 — 0,095; 5 — 0,09 $\text{мкКл}/\text{см}^2$

для данной модели рассчитана зависимость $I_c=f(U_T)$ для разных доз ионного легирования встроенного канала МОП-транзистора обедненного типа, которая имеет вид, представленный на рис. 4.

Таким образом, используя корреляционную зависимость тока стока МОП-транзистора обедненно-

го типа и порогового напряжения МОП-транзистора обогащенного типа в комплементарной паре тестовых транзисторов, можно с высокой точностью (менее 5%) определить необходимую дозу ионного легирования для подгонки порогового напряжения в пределах $1,0 \pm 0,2 \text{ В}$.

Юстировка пороговых напряжений К-МОП-структур облучением α -частицами

Для юстировки пороговых напряжений комплементарных транзисторов К-МОП БИС используют радиационную технологию [8] с α -облучением из радионуклидного источника ^{238}Pu на установке АОИС-17Б с энергией 4 — 5 МэВ и плотностью $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Облучение структур БИС α -частицами производится через затворный окисел толщиной 350 — 500 Å на протяжении 5 — 10 мин, что обеспечивает дозу $(1..9) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Это приводит к увеличению концентрации основных носителей в электронном полупроводнике и к уменьшению концентрации и инверсии типа проводимости в дырочном полупроводнике.

Такая прецизионная технология обеспечивает подгонку пороговых напряжений комплементарной n - и p -МОП-пары с точностью $\pm 0,1 \text{ В}$ и обеспечивает получение оптимальных для К-МОП-структур БИС значений $U_{тп}$, $U_{тр}$ ($1,0 \pm 0,1 \text{ В}$). Контроль пороговых напряжений осуществляется с помощью импульсных вольт-фарядных характеристик, что обеспечивает необходимую точность измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Технология СБИС / Под ред. С. Зи. — М. : Мир, 1986.
2. Маллер Р., Кетмис Т. Элементы интегральных схем. — М. : Мир, 1988.
3. Новосядлый С. П., Остапчук А. И., Гуменьяк С. Д., Алексейко П. С. Применение трехфтористого бора $^{10}\text{BF}_3$ изотоп 10 при формировании областей К-МОП-структур // Электронная техника. Сер. Технология, организация производства и оборудование. — 1984. — Вып. 1. — С. 33.
4. Новосядлый С. П., Остапчук А. И., Гуменьяк С. Д., Алексейко П. С. Метод оперативного контроля ионного легирования бора и фосфора малыми дозами // Там же. — С. 82.
5. А. с. 1786542 СССР. Способ определения малых доз ионного легирования / С. П. Новосядлый., А. И. Карплюк. — 08.09.92.
6. А. с. 716444 СССР. Способ изготовления тонкопленочных резисторов / С. П. Новосядлый. — 22.10.79.
7. Новосядлый С. П., Бирковский Ю. Л. Контроль малых доз ионного легирования // Тез. докл. V междунар. конф. физики и технологии тонких пленок. — Т. 1. — Ивано-Франковск, 1995. — С. 91.
8. Новосядлый С. П. Радиационное регулирование пороговых напряжений МОП-транзисторов БИС // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы средств телекоммуникаций, компьютерной инженерии и подготовки специалистов». — Львов, 1998. — С. 167.