

ОКСИД ГАДОЛИНИЯ. НОВЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СБИС

© 2004 В.А.Рожков, М.А.Родионов,¹ А.В.Пашин, А.М.Гурьянов²

Исследована новая диэлектрическая структура, состоящая из тонкого термически окисленного гадолиния на кремнии с тонким промежуточным слоем SiO_2 и без него, в качестве диэлектрика конденсатора с большой накопительной способностью для сверхбольших интегральных схем (СБИС). В этой работе описываются электрические характеристики структур $\text{Al-Gd}_2\text{O}_3$ (25–28 нм)-Si. Конденсаторы $\text{Al-Gd}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si}$ (МГОК) и $\text{Al-Gd}_2\text{O}_3\text{-Si}$ (МГК) обладают вольт-амперными характеристиками с плотностью тока утечки меньшей 10^{-10} А·см⁻² при постоянном электрическом напряжении 5 В. Высоочастотные вольт-емкостные характеристики имели очень небольшой гистерезис для скорости изменения пилообразного электрического напряжения 2 В·с⁻¹. Средняя плотность межграничного заряда ($Q_f + Q_{it}$) равнялась $2,8 \cdot 10^{-7}$ Кл·см⁻², а плотность поверхностных состояний N_{ss} при потенциале плоских зон составляла $7,8 \cdot 10^{11}$ см⁻²·эВ⁻¹. Представленные характеристики и большая величина диэлектрической проницаемости оксида гадолиния на кремнии, равная ~11–12, позволяют использовать рассматриваемый диэлектрик в накопительных конденсаторах устройств динамической оперативной памяти (УДОП) и в вызывающих конденсаторах двухпозиционных переключателей.

Введение

В последние годы проводится интенсивный поиск путей увеличения крутизны полевых транзисторов и уменьшения размеров конденсаторов в сверхбольших интегральных схемах (СБИС). Эта проблема решается путем уменьшения толщины пленки SiO_2 , которая широко используется как подзатворный диэлектрик, а также как изолятор для накопительных конденсаторов. Однако высокое электрическое поле и сквозные поры в диэлектрике

¹Рожков Виктор Аркадьевич (rozhkov@ssu.samara.ru), Родионов Максим Александрович (rodionow@rambler.ru), кафедра электроники твердого тела Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

²Пашин Алексей Владимирович (Pashin@ssaba.smr.ru), Гурьянов Александр Михайлович, кафедра физики Самарского архитектурно-строительного университета, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194.

ограничивают толщину пленки SiO_2 до 6,5–7,0 нм [1]. Поэтому, чтобы обеспечить большую емкость конденсатора и высокую плотность элементов в СБИС, требуется применять материалы с высокой диэлектрической проницаемостью.

Недавно Ta_2O_5 был предложен как материал с высокой диэлектрической проницаемостью [2, 3]. Его диэлектрическая проницаемость лежит в пределах 20–25. Однако он обладает высокой проводимостью или большой плотностью тока утечки. В настоящей работе исследованы тонкие пленки оксида гадолиния (25–28 нм) и физические свойства кремниевых МДП-систем типа алюминий/оксид гадолиния (25–28 нм)/двуокись кремния (3 нм)/кремний (МГОК) и алюминий/оксид гадолиния (25–28 нм)/кремний (МГК).

1. Методика изготовления образцов

Образцы изготавливались на кремниевых монокристаллических подложках марки КЭФ-5 и КДБ-4,5, прошедших стандартную химическую обработку. Буферный слой оксида кремния выращивался перед изготовлением активной пленки оксида гадолиния. Естественный слой оксида кремния с некоторых подложек удалялся путем травления в 10% водном растворе плавиковой кислоты. Толщина оксида кремния измерялась при помощи сканирующего зондового микроскопа типа P7-LS-MDT. Диэлектрические пленки Gd_2O_3 были получены термическим окислением металлического слоя гадолиния на воздухе при температуре 700 °С в течение 1 часа. Пленка редкоземельного металла наносилась методом термического распыления гадолиния из молибденовой лодочки в вакууме $\sim 10^{-5}$ Тор на установке типа ВУП-5. Алюминиевые электроды площадью $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ к слою оксида гадолиния создавались термическим распылением алюминия через металлическую маску.

2. Особенности эксперимента

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись на постоянном токе с помощью электрометра типа ЭД-05М, чувствительность которого составляла $\sim 10^{-15}$ А. Плотность поверхностных состояний на границе раздела $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-Si}$ Nss определялась методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ), измеряемых на частоте 1 МГц с записью характеристик на двухкоординатном самопишущем потенциометре. Зависимости активной составляющей проводимости G и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от напряжения V измерялись на частоте 1 МГц с помощью цифрового измерителя L , C , R типа Е7-12. Скорость поверхностной генерации и время жизни неосновных носителей заряда в (МГОК) и (МГК) конденсаторах определялись с помощью метода Цербста [4].

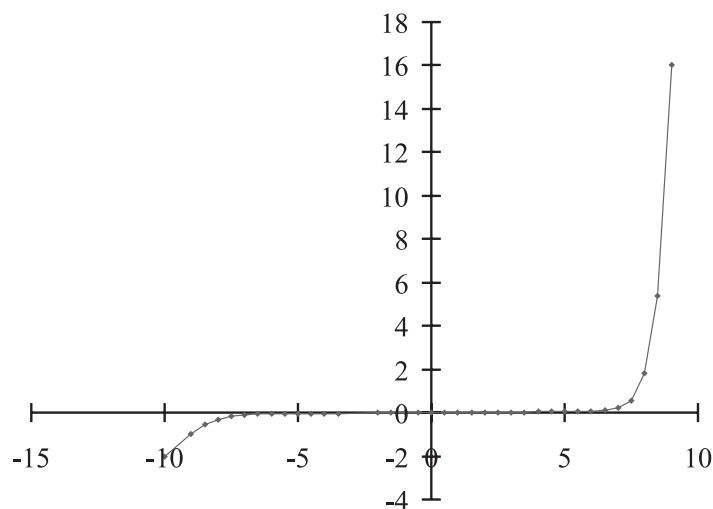


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика МДП-структуры

3. Результаты и их обсуждение

А. Вольт-амперные характеристики. На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика МГК конденсатора. Токи утечки через диэлектрик составляют $3,6 \cdot 10^{-13}$ – $1,1 \cdot 10^{-12}$ А при напряжении 5 В и площади электрода $2,4 \cdot 10^{-3}$ см² как для МГОК, так и МГК конденсаторов. Этот ток соответствовал плотности тока $\sim 10^{-10}$ А·см⁻² при электрическом поле в $\sim 2,5$ МВ·см⁻¹ в пленках оксида гадолиния толщиной 25–28 нм. На рис. 2 представлена ВАХ МДП-структуры, построенная в координатах Пула–Френкеля. Как видно, эта характеристика прямолинейна при высоких значениях напряженности электрического поля в диэлектрике. Данный результат, а также малые значения коэффициентов выпрямления (отношение прямого тока к обратному для одного и того же значения прямого и обратного напряжения) указывают на то, что проводимость образцов ограничивается объемом пленки оксида редкоземельного элемента и описывается механизмом Пула–Френкеля. Как для МГОК, так и для МГК МДП-конденсаторов напряжения пробоя диэлектрических слоев толщиной 25–28 нм лежали в пределах 10–15 В. Эти пробивные напряжения соответствовали пробивным электрическим полям равным 4–6 МВ·см⁻¹.

В. Вольт-фарадные характеристики, зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и активной составляющей проводимости от напряжения. На рис. 3 приведена вольт-фарадная (C–V) характеристика МДП-конденсаторов с кремнием n-типа проводимости. Для МГК конденсаторов с площадью электрода $2,4 \cdot 10^{-3}$ см² значение емкости в области аккумуляции поверхности полупроводника основными носителями заряда

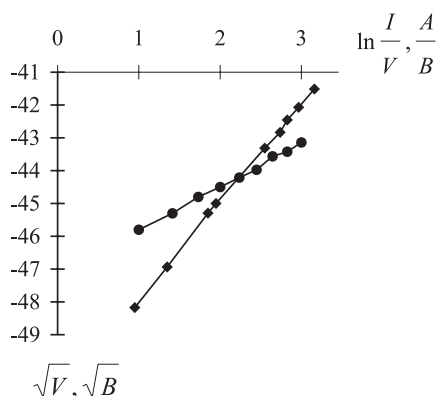


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика МДП-структуры в координатах Пула—Френкеля

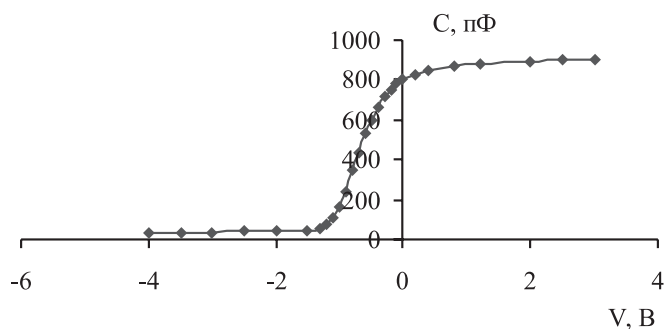


Рис. 3. Вольт-фарадная характеристика МДП-конденсатора

составляло 900 ± 5 пФ, а емкость в области инверсии поверхностной проводимости кремния равнялась 29 ± 2 пФ. Высокочастотные $C-V$ характеристики практически не имели гистерезиса при скорости изменения пилообразного напряжения $2 \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$. Область управляющих напряжений лежит в пределах от 0 до $-1,5$ В. Крутизна вольт-фарадной характеристики при напряжении плоских зон равнялась $815 \text{ пФ} \cdot \text{В}^{-1}$, а отношение емкости в области аккумуляции к емкости в области инверсии поверхности полупроводника составляло 30,8. Аккумуляционная емкость для исследуемых структур соответствовала аналогичному значению для структур с диэлектрическим слоем из двуокиси кремния толщиной $\sim 9,2$ нм и диэлектрической постоянной, равной 3,9. Для оксида гадолиния, нанесенного на кремний, мы получили значение диэлектрической проницаемости равное 11–12. Для того чтобы определить плотность заряда и плотность поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик, $C-V$ характеристики для исследуемых МДП-структур сравнивались с идеальными $C-V$ кривыми, соответствующими

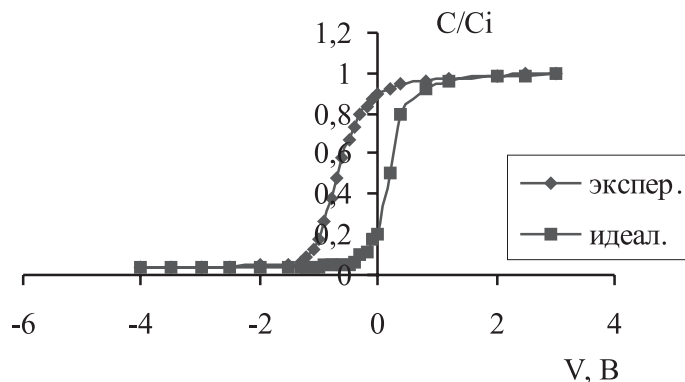


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики исследуемой и идеальной МДП-структуры, нормированные к емкости диэлектрика

щими эффективной толщине двуоксида кремния (рис. 4). Этот анализ дает среднее значение плотности поверхностных состояний (быстрые состояния + фиксированный заряд) приблизительно равное $1,75 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. МГОК конденсаторы также имели хорошие $C-V$ характеристики. Как для МГОК, так и для МГК конденсаторов среднее значение плотности поверхностных состояний равнялось $7,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ вблизи напряжения плоских зон.

На рис. 5 представлены зависимости активной составляющей проводимости G и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, измеренные на частоте сигнала 1 МГц, от приложенного к МДП-структуре постоянного электрического напряжения V . Здесь, кривая 1 соответствует зависимости G от V , кривая 2 описывает поведение зависимости $\text{tg } \delta$ от V . Активная составляющая проводимости монотонно увеличивается при переходе от обедняющих к обогащающим поверхность полупроводника основными носителями заряда напряжениям и выходит на насыщение в области напряжений, соответствующих инверсии и аккумуляции на поверхности полупроводника. Величины проводимости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов в области напряжений, соответствующих состоянию аккумуляции поверхности полупроводника, превышали аналогичные значения для случая инверсии типа проводимости на поверхности полупроводника. Величины тангенса угла диэлектрических потерь МГОК и МГК конденсаторов составляли 0,01–0,33. При аккумуляции на поверхности полупроводника наблюдается некоторое уменьшение значений тангенса угла диэлектрических потерь по сравнению с состоянием плоских зон. При этом при потенциале плоских зон на этой зависимости появляется максимум. Эти закономерности обусловлены тем, что при переходе от напряжений, соответствующих состоянию плоских зон, к области аккумуляции или инверсии реактивная составляющая проводимости структуры изменяется быстрее активной. На кривой G от V подобного

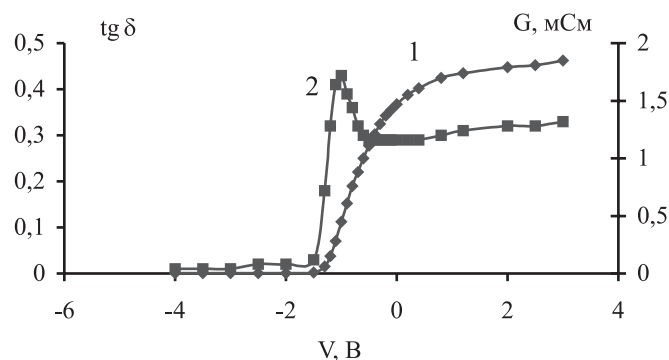


Рис. 5. Зависимости активной составляющей проводимости и тангенса угла диэлектрических потерь от приложенного напряжения

поведения не наблюдается. Значения активной составляющей проводимости для исследуемых структур лежат в пределах от 0,002 мСм до 1,85 мСм.

Для определения скорости поверхностной генерации и времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии проводились измерения кинетических зависимостей емкости МДП-систем при неравновесном обеднении поверхности полупроводника основными носителями заряда, создаваемом прямоугольными импульсами напряжения [4]. После приложения импульсного обедняющего напряжения происходил резкий спад значения емкости, обусловленный увеличением толщины области пространственного заряда в полупроводнике, вследствие ухода основных носителей заряда в объем кремния. Затем емкость МДП-системы релаксировала к равновесному значению, соответствующему инверсии проводимости на поверхности полупроводника. Увеличение значения емкости структуры со временем обусловлено термической генерацией электронно-дырочных пар в области пространственного заряда и на поверхности кремния, которые разделяются электрическим полем приповерхностной области полупроводника. В результате неосновные носители заряда накапливаются на границе раздела полупроводник-диэлектрик, образуя инверсионный слой. Основные носители заряда дрейфуют под действием электрического поля в объем полупроводника. При этом толщина обедненной области уменьшается, а емкость структуры увеличивается. Скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда, определенная по методике Цербста, для различных образцов равнялась 300–510 см·с⁻¹, а время жизни неосновных носителей заряда лежит в пределах 0,005–0,03 мкс. Низкие значения скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда свидетельствуют о хорошем качестве границы раздела кремния с оксидом гадолиния, получаемом в исследованных структурах при низкотемпературном режиме изготовления диэлектрической пленки. Таким образом проведенный анализ электрических свойств

тонких пленок оксида гадолиния показывает перспективность использования этих пленок для пассивных конденсаторов и МДП-приборов в СБИС. Представленные характеристики и большая величина диэлектрической проницаемости оксида гадолиния на кремнии, равная $\sim 11\text{--}12$, позволяют использовать рассматриваемый диэлектрик в накопительных конденсаторах устройств динамической оперативной памяти и в развязывающих конденсаторах двухпозиционных переключателей.

Литература

- [1] Shinodo D. Era of ULSI: Future prospects // Denish Liayro. 1985. V. 22. No. 7.
- [2] Fabrication procedure to obtain high quality tantalum pentoxide films on silicon // IBM Discl. Bull. 1985. Vol. 27. No. 10A. P. 5896.
- [3] Oehrlein G.S. Oxidation temperature dependence of the electrical conduction characteristics and dielectric strength of thin Ta₂O₅ films on silicon // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. No. 5. P. 1587–1593.
- [4] Zerbst M. Relaxationeffekte an Halbleiter-Isolator-Grenzflächen // Zeit. angew. Phys. 1966. B. 22. No. 1. S. 30–33.

Поступила в редакцию 19/VII/2004;
в окончательном варианте — 19/VII/2004.

GADOLINIUM OXIDE. NEW DIELECTRIC STRUCTURES FOR ULSI CIRCUITS

© 2004 V.A. Rozhkov, M.A. Rodionov,³ A.V. Pashin, A.M. Guryanov⁴

A new dielectric structure which consists of a thin thermally oxidized gadolinium on silicon with and without a thin intermediate SiO₂ layer is investigated as a high storage capacity insulator for ultra-large-scale integrated (ULSI) circuits. In the paper electrical characteristics of Al/gadolinium oxide (25 nm)/Si structures are described. The Al/Gd₂O₃/SiO₂/Si (MGOS) and Al/Gd₂O₃/Si (MGS) capacitors show very well-behaved volt-amps characteristics with leakage current density 10^{-10} A·cm⁻² at 5 V. High-frequency voltage-capacitance characteristics show without hysteresis for bias ramp rate ranging 2 V·s⁻¹. The average interface charge density ($Q_f + Q_{it}$) is $2,8 \cdot 10^{-7}$ C·cm⁻² and interface state density N_{ss} is $7,8 \cdot 10^{11}$ cm⁻²·eV⁻¹ near the flat band potential of silicon. These electrical characteristics and dielectric constant of 11–12 for gadolinium oxide on Si make it a viable dielectric for dynamical random access memory (DRAM) storage capacitors and for decoupling capacitors for on- and off-chip applications.

Paper received 19/VII/2004.

Paper accepted 19/VII/2004.

³Rozhkov Victor Arkad'evich (rozhkov@ssu.samara.ru), Rodionov Maksim Alexandrovich (rodionow@rambler.ru), Dept. of Solid State Electronics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.

⁴Pashin Alexey Vladimirovich (Pashin@ssaba.smr.ru), Guryanov Alexanr Michaylovich, Dept. of Physics, Samara State Architecture Building University, Samara, 443001, Russia.