

Д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ,
д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН, д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ

Украина, г. Одесса, Нац. университет им. И. И. Мечникова,
Украинская нац. академия связи им. А. С. Попова
E-mail: root@usat.ukrtel.net

Дата поступления в редакцию
30.01 2001 г.
Оппоненты д. т. н. В. И. БОРЩ,
к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ

КРЕМНИЕВЫЕ МДП-СТРУКТУРЫ С ОКСИДАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ДИЭЛЕКТРИКА

Использование оксидов Dy, Er, La в качестве подзатворного диэлектрика МДП-структур способствует развитию элементной базы микроэлектроники.

Одним из важных направлений развития элементной базы микроэлектроники является разработка и использование приборов с переносом заряда (ППЗ) на основе МДП-структур. Разновидностями таких структур являются приборы с зарядовой инжекцией.

Необходимость получения больших сигналов, которые легко детектировать с большим соотношением сигнал/шум, требует создания в ППЗ возможно больших величин информационного заряда [1, с. 125]. Максимальная величина этого заряда

$$Q_{\max} \approx C_d U_{\text{пр}},$$

где C_d — емкость диэлектрика, $C_d = S_3 \epsilon_0 \epsilon_d / d$;

S_3 — площадь затвора;

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;

ϵ_d — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

d — толщина диэлектрика;

$U_{\text{пр}}$ — напряжение пробоя диэлектрика.

Величина зарядового пакета, запасенного в потенциальной яме под накапливающим полевым электродом МДП-элемента, пропорциональна удельной емкости слоя оксида. Поэтому очевидна перспективность использования в качестве диэлектриков МДП-элементов ППЗ материалов с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ_d . Это необходимо также для достижения повышенных значений времени накопления заряда [2, с. 36].

Применение материалов с высокой ϵ_d актуально также для МДП полевых транзисторов. Удельная крутизна проходной вольт-амперной характеристики (ВАХ) полевого транзистора пропорциональна крутизне выходной ВАХ [3, с. 287]:

$$b = \mu w C / L = \mu \epsilon_0 \epsilon_d w / d L,$$

где μ — подвижность носителей заряда в канале;

w — ширина канала;

L — длина канала.

В основе работы МДП-фотоустройства лежит эффект изменения емкости структуры под действием

света. Максимальная емкость определяется емкостью диэлектрика C_d , а минимальная — емкостью области пространственного заряда в полупроводнике $C_{\text{опз}}$ [4, с. 89]. Фоточувствительность варикапов повышается при увеличении коэффициента перекрытия $K = C_d / C_{\text{опз}}$, т. е. при увеличении ϵ_d и уменьшении толщины диэлектрика.

В настоящее время МДП-структуры на основе кремния создаются, в основном, с использованием в качестве подзатворного диэлектрика пленок SiO_2 и Si_3N_4 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_d = 4 \dots 7$. Вместе с тем известно, что пленки оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ) обладают хорошими диэлектрическими свойствами [5]. Например, в качестве варикапов предложены МДП-структуры с оксидом иттербия [6].

В данной работе проведено изучение свойств кремниевых МДП-элементов с пленками РЗЭ (Dy_2O_3 , Er_2O_3 , La_2O_3) в качестве диэлектрика.

На кремниевые подложки n -типа проводимости ВЧ катодным напылением наносились пленки РЗЭ, которые затем подвергались операции термического окисления в кислородсодержащей среде при температуре $T = 400 \dots 800$ К в течение 10...30 мин. Диэлектрические слои толщиной $d = 0,2 \dots 0,5$ мкм получали 3–4-кратным напылением пленок РЗЭ с последующим окислением. Такой способ послойного напыления позволяет избежать неполного окисления, а также значительно снизить число сквозных пор в пленках.

Для формирования МДП-структур на пленку оксида РЗЭ термическим напылением в вакууме наносили алюминиевые полевые электроды диаметром 0,8 мм. Контакт к полупроводниковой подложке также изготавливали из алюминия. Для сравнения изготавливались структуры $\text{Si} - \text{SiO}_2$ методом высокотемпературного окисления кремния с последующей термообработкой.

Параметры, характеризующие диэлектрические свойства оксидов в МДП-структурах, в т. ч. удельная емкость ($C_{\text{уд}}$), поверхностный заряд (Q_{ss}) и плотность поверхностных состояний (N_{ss}), приведены в **таблице**. Они близки для различных оксидов РЗЭ и зависят от условий получения диэлектрика, как отмечено в [7].

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Оксид	$C_{уд} \cdot 10^{-3}$, пФ/см ²	ϵ_d	tg δ	$E_{пр}$, В/см	Q_{ss} , Кл/см ²	N_{ss} , см ⁻² ·эВ ⁻¹
Er ₂ O ₃	50...70	10...11	0,02	10 ⁶	2...3,2	1
Dy ₂ O ₃	60...90	11...12	0,01	3·10 ⁶	2...3	1
La ₂ O ₃	30...40	8...10	0,02	10 ⁶	2,8...3	3,2
SiO ₂	17...20	4	0,02	1,2·10 ⁶	1...2	0,9

Пленки, полученные при температуре окисления $T=500...700$ К, обладают удельным сопротивлением $\rho=10^{13}...10^{16}$ Ом·см, напряженностью пробивного поля $E_{пр}=(1...3) \cdot 10^6$ В/см. Величина относительной диэлектрической проницаемости для различных слоев РЗЭ $\epsilon_d=8...12$. Тангенс угла диэлектрических потерь tg δ при толщине слоя $d \approx 0,15$ мкм на частоте 8 кГц составляет 0,007...0,2, возрастая с уменьшением толщины пленки. Для слоев, полученных окислением при температуре $T < 500$ К, значение tg δ увеличивается до 0,1, при этом значительно ухудшаются также изоляционные свойства пленок ($\rho=10^6...10^9$ Ом·см, $E_{пр}=10^5$ В/см).

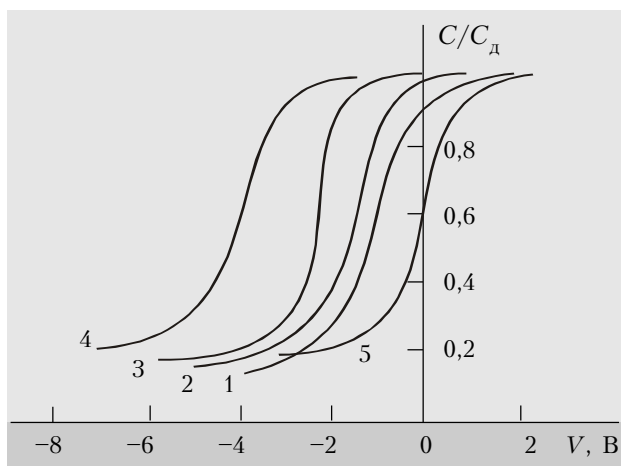


Рис. 1. Нормированные вольт-фарадные характеристики: 1 – Si–SiO₂; 2 – Si–Dy₂O₃; 3 – Si–Er₂O₃; 4 – Si–La₂O₃; 5 – расчет

Вольт-фарадные характеристики МДП-структур с оксидами РЗЭ по виду существенно не отличаются от $C-V$ -характеристик для кремния с традиционными (SiO₂, Si₃N₄) диэлектриками (рис. 1). Характеристики измерялись на частоте $f=1$ МГц, скорость изменения напряжения составляла $\sim 0,15$ В/см. Явлений гистерезиса при этом не наблюдалось, т. е. движения ионов или перезарядки центров захвата не происходило.

Методом кинетических характеристик емкости при нестационарном истощении поверхности полупроводника основными носителями заряда определены параметры поверхностных центров кремния. Из сравнения измеренных $C-V$ -характеристик с рассчитанной (без учета поверхностных состояний) определены поверхностный заряд Q_{ss} и плотность поверхностных состояний N_{ss} на границе "полупроводник – диэлектрик". Для большинства структур с различными оксидами РЗЭ эффективный поверхностный заряд был положительным и не

превышал $3,2 \cdot 10^{-8}$ Кл/см². Наличие такого положительного заряда характерно для окисленной поверхности кремния [8, с. 114]. В нашем случае величина Q_{ss} возрастала, если пленку оксида РЗЭ создавали на тонком (5...8 нм) слое SiO₂, полученном кипячением кремния в азотной кислоте.

Термополевую обработку проводили по методикам, описанным в [9]. Выдержка структур (например Al–Er₂O₃–Si) в течение 15 мин при $T=450$ К и при приложенном прямом напряжении $V=5$ В вызывает сдвиг $C-V$ -характеристик в область отрицательных значений напряжения. Величина Q_{ss} при этом увеличивается с $3 \cdot 10^{-8}$ до $8 \cdot 10^{-8}$ Кл/см². Термообработка при отрицательном смещении вызывает незначительный сдвиг $C-V$ -характеристики в область положительных напряжений. Подобное поведение $C-V$ -характеристик можно объяснить миграцией в слое диэлектрика положительных ионов, образованных в результате неконтролируемого легирования пленок [10].

Распределение плотности энергетических состояний на границе раздела "кремний – оксид РЗЭ" по ширине запрещенной зоны кремния приведено на рис. 2.

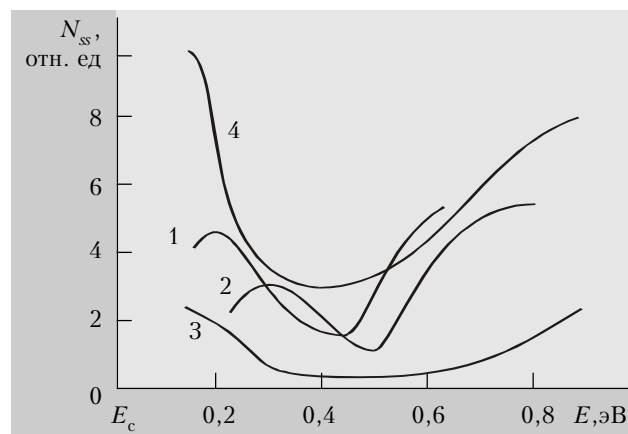


Рис. 2. Распределение плотности состояний границы раздела "оксид – полупроводник" по энергиям в пределах запрещенной зоны кремния:

1–3 – Si–Dy₂O₃; 4 – Si–SiO₂;
1 – <111>, 700 К; 2 – <111>, 500 К; 3 – <100>, 500 К;
4 – <111>, 500 К

Как и для структур Si–SiO₂ [11], плотность состояний минимальна вблизи середины запрещенной зоны и возрастает у краев C - и V -зон. Величина максимальной плотности N_{ss} , в соответствии с [12], зависит как от ориентации подложки, так и от условий получения диэлектрического слоя. Для наших структур, полученных при температуре окисления $T=500$ К, минимальная плотность N_{ss} для ориентации кремния <100> составляла $\approx 2 \cdot 10^{10}$ см⁻² эВ⁻¹, для ориентации <111> $N_{ss} \approx 1,2 \cdot 10^{11}$ см⁻² эВ⁻¹. Такие различия в величинах N_{ss} объясняются разными значениями энергии активации и числа свободных связей атомов для различной ориентации поверхности кристалла [13]. Зависимость плотности N_{ss} от температуры получения пленок оксидов РЗЭ менее суще-

стенна: при $T=500\text{ К}$ $N_{ss}=1,2 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}\text{В}^{-1}$, при $T=700\text{ К}$ $N_{ss}=2 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}\text{В}^{-1}$.

Изучение механизма электропроводности слоев оксидов РЗЭ проводили на основе анализа вольт-амперных характеристик, которые измеряли на постоянном и переменном ($f=50 \dots 2 \cdot 10^4\text{ Гц}$) сигнале. Коэффициент выпрямления составлял $10^2 \dots 10^3$. Прямому смещению соответствует положительное напряжение на полевом электроде. Для большинства исследованных структур ВАХ линейны в координатах $\lg I - V^{1/2}$. Как и для Si-SiO₂-элементов, это характерно для электропроводности, обусловленной надбарьерной эмиссией носителей заряда (механизм Шоттки) или термоионизацией примесных центров (механизм Пула-Френкеля).

Таким образом, диэлектрические параметры изученных нами элементов «кремний-пленка оксида РЗЭ» близки к характеристикам Si-SiO₂-структур, а по ряду параметров даже лучше. Величина удельной емкости МДП-элементов с оксидами РЗЭ значительно превышает $C_{уд}$ для структур с SiO₂.

Низкотемпературная технология получения пленок оксидов РЗЭ позволяет использовать эти материалы при создании МДП-структур на основе многокомпонентных (в т. ч. узкозонных) полупроводников, для которых высокотемпературная обработка нежелательна.

Большая величина удельной емкости определяет преимущества использования оксидов РЗЭ в качестве подзатворного диэлектрика МДП-элементов. Это дает возможность улучшить эксплуатационные характеристики систем отображения информации, МДП-транзисторов, расширить диапазон изменения емкости фотоварикапов, а также создавать малогабаритные конденсаторы большой емкости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. — М.: Мир, 1978.
2. Ковтонюк Н. Ф., Сальников Е. Н. Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений. — М.: Радио и связь, 1990.
3. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — М.: Энергия, 1977.
4. Зуев В. В., Попов В. Г. Фотоэлектрические МДП-приборы. — М.: Радио и связь, 1983.
5. Андреева А. Ф., Гильман М. А., Сигалин М. Д. Перспективы применения пленок оксидов редкоземельных металлов в оптической и электронной промышленности / В кн.: Получение и свойства тонких пленок. — Киев.: Изд-во ИПМ АН УССР, 1987. — С. 154–159.
6. Чернобровкин Д. И., Бахтинов В. В. Диэлектрические свойства пленок окислов редкоземельных элементов / В кн.: Диэлектрики. — Киев.: Изд-во КГУ, 1981. — С. 96–98.
7. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1990.
8. Стриха В. И., Бузанева Е. В. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике. — М.: Радио и связь, 1987.
9. Пека Г. П. Физические явления на поверхности полупроводников. — Киев: Вища школа, 1984.
10. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник. — М.: Радио и связь, 1982.
11. Пресс В. Ф. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1991.
12. Физика и химия редкоземельных полупроводников. — Новосибирск: Наука, 1990.
13. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. — М.: Мир, 1984.



Одесса 2002

ПЕРВАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА-СИМПОЗИУМ
ИЗОБРЕТЕНИЙ, ИДЕЙ И ТЕХНОЛОГИЙ

Миллениум

11–14 АПРЕЛЯ 2002 ГОДА



Одесса 2002

ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ-СИМПОЗИУМА:

- ✓ Информационные и компьютерные системы
- ✓ Энергосбережение ✓ Экология
- ✓ Медицина ✓ Биотехнологии

В рамках выставки-симпозиума будут проведены конференции по вопросам научных исследований в области строительства, транспорта, информатики, тенденций развития науки и образования, защиты интеллектуальной собственности.

ВЦ «Морские технологии»: офис 2, пер. Сабанский 1, 65014, Одесса, Украина
Тел.: (0482) 22-75-00, факс: (0482) 25-09-66
E-mail: abe@sudohodstvo.com
Web-site: www.sudohodstvo.com