

К. т. н. А. М. СВЕТЛИЧНЫЙ,
к. т. н. О. А. АГЕЕВ, Д. А. ШЛЯХОВОЙ

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический ун-т
E-mail: oxid@itt.net.ru

Дата поступления в редакцию
10.01 2001 г.
Оппонент к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК SiO_2 МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Рассмотрены физические явления в системе O_2 - SiO_2 - Si под действием некогерентного излучения в процессе быстрой термической обработки.

В настоящее время технология микроэлектроники осваивает субмикронные размеры СБИС, где толщина подзатворных диэлектриков для КМОП СБИС снизилась более чем на порядок и приблизилась к 5–10 нм. Сформировать такие окислы обычным термическим окислением сложно, т. к. процессы нагрева и охлаждения полупроводниковых пластин в диффузионных печах очень инерционны, что не позволяет точно контролировать технологические режимы окисления и, следовательно, приводит к разбросу электрофизических параметров полупроводниковых структур. Поэтому тонкие (10–20 нм) и ультратонкие (менее 10 нм) окислы формируются методом быстрой термической обработки (БТО) [1, 2].

Особенностью этого метода является быстрый нагрев и охлаждение подложек (~30–50°С/с) с использованием некогерентных источников света. Обработка полупроводниковых пластин осуществляется в режиме теплового баланса с длительностью нагрева от единиц до десятков секунд. Существенным достоинством технологии БТО является возможность отслеживать процесс окисления в реальном режиме времени с точностью до долей секунды. Для этого уже имеется технологическое оборудование и программное обеспечение [3, 4].

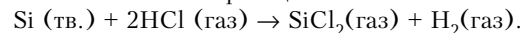
Разнообразие режимов окисления кремния методом БТО привело к появлению экспериментальных данных, редко укладывающихся на одной кинетической кривой роста окисла. Это часто затрудняет определение физических процессов, описывающих формирование диоксида кремния. Однако общей отличительной особенностью БТО является фотонный нагрев окисляемых подложек. Поэтому для успешного объяснения экспериментальных данных необходимо рассмотреть условия получения пленок, типы используемых источников излучения для БТО и определить их влияние на формируемую структуру "кремний — диоксид кремния".

Особенности технологических процессов получения тонких пленок SiO_2 при БТО

Получение высококачественного диоксида кремния невозможно без тщательного контроля за чистотой технологического процесса, где особую роль

занимает очистка подложки. Наибольшее распространение получила преокислительная очистка в течение нескольких минут в растворах NH_4OH , HCl , N_2SO_4 на основе перекиси водорода (H_2O_2) [1, 5] с последующей обработкой (~30 с) в 1–2%-ном растворе HF [1, 5, 6] для удаления природного окисла. При этом все этапы обработки сопровождаются промыванием подложек в деионизованной воде.

Операцию очистки и удаления природного окисла можно осуществить в атмосфере HCl или CF_4 непосредственно перед окислением [7]. Газовое травление обычно применяется в тех технологических процессах, в которых особенно важную роль играет структура поверхностного слоя (в данном случае — при получении тонкого подзатворного окисла в МДП-структурах). Этот процесс обычно осуществляется при температурах 800–1000°С и описывается реакцией



В работе [8] преокислительная очистка проводилась в атмосфере 1% HCl/Ag или H_2 при температурах 700–900°С в течение 20–60 с.

В общем случае применение тех или иных методов очистки определяется и толщиной нарушенного приповерхностного слоя подложки, и условиями окисления, выбор которых определяется необходимой толщиной и свойствами формируемого окисла. Тонкие пленки (10–20 нм) и окислы с минимальным зарядом на границе $\text{Si}-\text{SiO}_2$ обычно получают в сухом кислороде. Выбор температуры окисления влияет на качество получаемых окислов, в частности, на их фазовый состав. Для пленок SiO_2 толщиной 5 нм, выращенных при температурах ниже 1000°С, исследования показали значительную неоднородность границы раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$, состоящую из аморфной и кристаллической фаз, что приводит к возникновению значительных термических напряжений [9]. В то же время для пленок, выращенных при температуре выше 1000°С, граница раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$ однородна в пределах двух атомных слоев.

В большинстве случаев для формирования пленок диоксида кремния со стабильными электрофизическими параметрами используют температурный диапазон 1000–1200°С [2, 6]. При дальнейшем повышении температуры начальная стадия роста пленки 5–7 нм протекает "мгновенно", что не позволяет точно контролировать процесс окисления. Применение низких температур (менее 1000°С) для получения окислов методом БТО ограничено не столько качеством пленок, сколько их медлен-

ным ростом (рис. 1, кривая 2). Этого удастся избежать, используя атмосферу окислителя из смеси сухого кис-

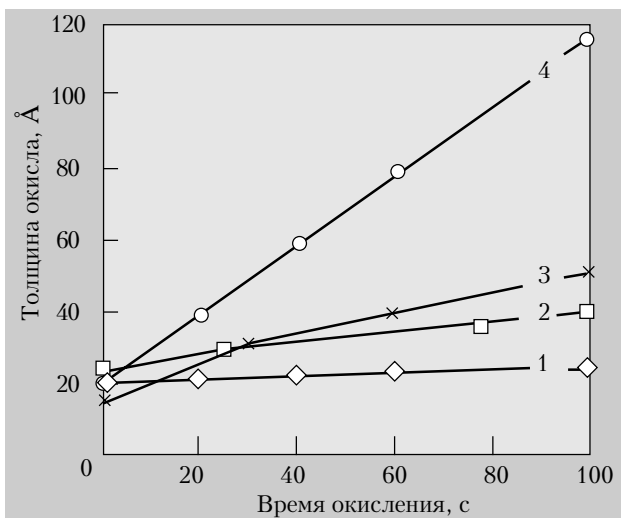


Рис. 1. Зависимость толщины окисла от времени окисления при 900°C:

1 – обычное термическое окисление в сухом O_2 ; 2 – окисление методом БТО в O_2 ; 3 – окисление методом БТО в O_2+O_3 ; 4 – чередование этапов окисления в O_2 и отжига в Ag при 1150°C

лорода (96–97%) и озона (3–4%) [10], что позволяет снизить температуру окисления до диапазона 600–900°C за счет увеличения скорости формирования диоксида кремния по сравнению с обычным термическим окислением до 300% (рис. 1, кривая 3). Применение вместо озона других газов (N_2 , HCl, H_2 и др.) незначительно влияет на скорость окисления, но уменьшает неоднородность и улучшает электрофизические параметры тонких пленок [11].

Одним из способов стабилизации характеристик полученных окислов является отжиг, влияющий на изменение фиксированного заряда в окисле и механических напряжений на границе Si–SiO₂ [9, 12]. Независимо от температуры окисления, наибольшее снижение фиксированного заряда наблюдается при температурах выше 1000°C в вакууме, в различных газах (N_2 , H_2 , Ag и др.), а также в их смесях. Механические напряжения, согласно [9], релаксируют при температурах более 1100°C в течение 10–15 с. Например, в работах [2, 13] процесс отжига тонких пленок (~15 нм) осуществлялся за 10–30 с при 1000–1200°C, что позволило сформировать окислы, по электрическим параметрам не уступающие пленкам, полученным обычным термическим способом. В работе [14] окисление кремния в сухом кислороде чередовалось с отжигом в аргоне при температуре 900°C. При этом наблюдалась зависимость толщины окисла от времени отжига между циклами окисления. Предполагается, что очень быстрый рост окисла (рис. 1, кривая 4) связан с релаксацией напряжений и, возможно, с изменением зарядовых состояний, влияющих на скорость роста пленки.

Источники излучения при окислении Si с помощью БТО

Разнообразие температурных режимов формирования и отжига тонких пленок во многом определяется источником нагрева. От его характеристик во многом зависит конструкция установки для БТО и

параметры технологического процесса, что, в конечном итоге, определяет качество окисла. Поэтому к источнику излучения предъявляются требования временной стабильности спектральных характеристик, высокой плотности и равномерности светового потока, надежности и т. д. В настоящее время интерес к некогерентным источникам излучения вызван их влиянием на кинетику роста окисла через фотостимулированные процессы в объеме газовой фазы и подложки в течение окисления, что подтверждено рядом работ [15, 16] (рис. 2).

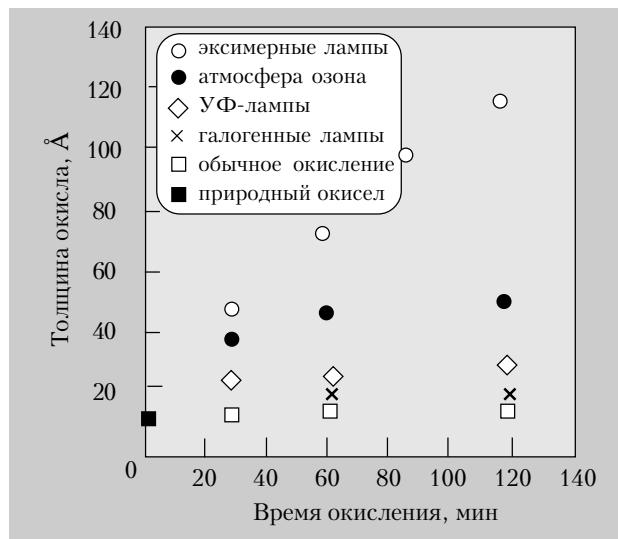


Рис. 2. Сравнение толщины окислов, сформированных методом БТО с применением различных источников излучения и термическим окислением в O_2 и O_3

Применяемые источники можно разделить по спектру излучения на инфракрасные (ИК), видимые и ультрафиолетовые (УФ). К первому и второму типам относятся широко используемые для нагрева подложек при БТО галогенные лампы с вольфрамовой нитью. Широкий спектр излучения этих ламп (0,2–4 мкм) хорошо согласуется со спектром поглощения кремниевой пластины. Однако снижение интенсивности излучения ниже 0,4–0,5 мкм не позволяет говорить о галогенных лампах как об эффективных источниках фотостимулируемых реакций с энергией активации 4–5 эВ [15–17].

В качестве источника УФ-излучения получили распространение ртутные электродуговые лампы [12], с успехом применяемые для отжига приповерхностных слоев подложек (1–10 мкм) и для активации фотохимических процессов при газофазном осаждении пленок. Их применение в технологии БТО оказывает влияние на кинетику роста окисла кремния. Нагрев подложек ртутными лампами в режиме теплового баланса невозможен, поэтому их используют совместно с галогенными источниками, что ограничивает диапазон режимов обработки.

В последнее время вырос интерес к новому поколению эксимерных ламп, излучающих в видимой и УФ-области спектра [16]. Это связано с развитием низкотемпературных процессов окисления и отжига методом БТО, стимулируемых коротковолновым излучением. К достоинствам этих ламп следует отнести высокую мощность и эффективность излучения. При этом большое

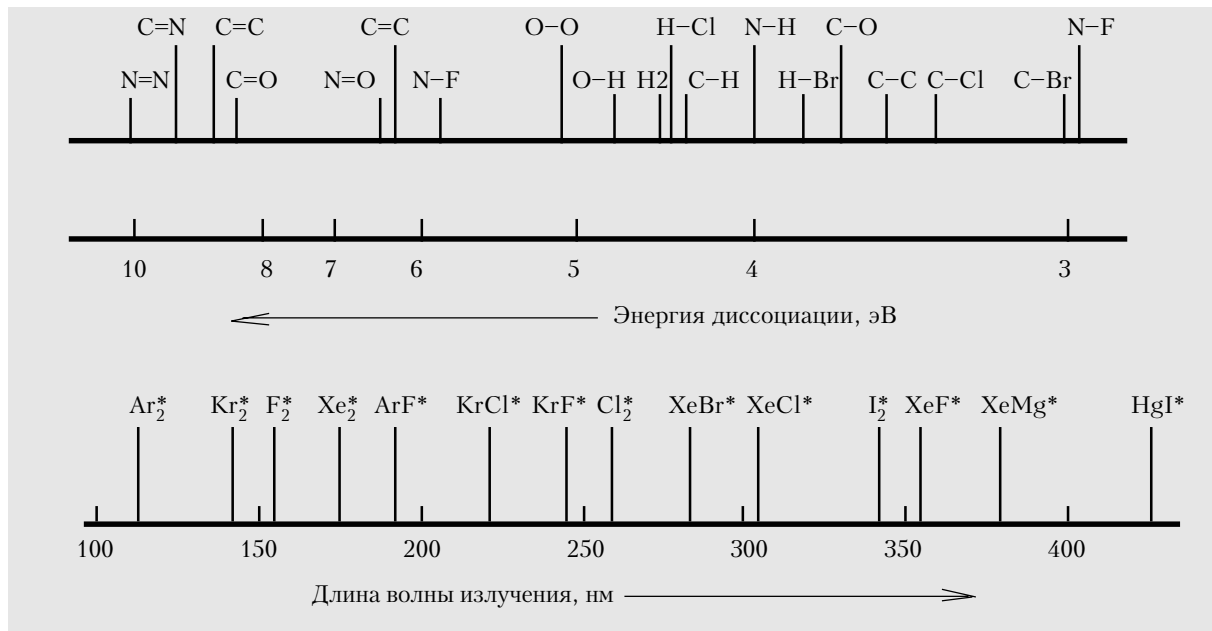


Рис. 3. Зависимость длины волны излучения эксимерных ламп от газа-наполнителя в сравнении с энергией, необходимой для диссоциации некоторых молекул газов, используемых в микроэлектронной технологии

разнообразие эксимерных молекул (Ar₂^{*}, Kr₂^{*}, Xe₂^{*}, ArCl^{*}, ArF^{*}, KrCl^{*}, HgNe^{*}, HgAr^{*} и др.) позволяет получать источники с максимумом излучения в области длин волн 110–650 нм с учетом спектра и коэффициента поглощения обрабатываемого вещества (рис. 3).

Применение источников различного спектрального состава и мощности излучения для БТО существенно зависит от конструктивных особенностей реактора [3, 4]. Ориентация пластины относительно источников излучения, ее толщина, тип используемых держателей подложек, теплопроводов и др. также влияют на облученность полупроводниковой структуры, температуру нагрева и, следовательно, на кинетику окисления кремния [18–20]. Для выяснения механизмов влияния этих факторов на кинетику процесса окисления необходимо рассмотреть воздействие излучения на систему Si–SiO₂.

Влияние излучения на формирование диоксида кремния

Известно, что тонкий окисел в условиях обычного термического окисления растет значительно быстрее, чем предсказывает линейно-параболическая модель окисления Дила–Гроува [21], поэтому для теоретического обоснования кинетики роста окислов был разработан ряд моделей, основанных на объемной диффузии заряженных частиц или нейтральных пар, на эффектах туннелирования электронов, образования слоя пространственного заряда, генерации упругих напряжений, на изменении структуры окисла и др. [22, 23]. Однако ни один из указанных механизмов не может полностью объяснить экспериментальные данные. Кинетика окисления при получении тонких и ультратонких пленок с применением БТО достаточно сложна, т. к. на процесс оказывает влияние фотостимулированное окисление.

Влияние технологии получения окисла на скорость роста пленок можно обнаружить, сравнив кри-

вые роста окисла из работ по окислению кремния методом БТО [1, 2, 6] и обычному термическому окислению [5, 24]. В случае нагрева подложки некогерентными источниками излучения пленка диоксида кремния толщиной 10–20 нм растет в 5–10 раз быстрее, чем при обычном термическом окислении (рис. 2). Предполагают, что существует несколько путей, по которым может проходить реакция формирования окисла. В случае БТО, вероятно, необходимо рассматривать два независимых и параллельно идущих процесса: фотостимулированное и термостимулированное окисление.

Фотостимулированная реакция в условиях БТО может быть достаточно сложной, и ее ход зависит от мощности и диапазона излучения применяемых источников, т. к. воздействие излучения на твердые тела и газы порождает в них физико-химические процессы, которые определяются свойствами облучаемого материала и энергией фотонов [16, 25]. В случае окисления кремния методом БТО система O₂–SiO₂–Si, получившая энергию извне, стремится к релаксации, которая, вероятно, идет через последовательность реакций, влияющих на динамику роста окисла.

Возможным эффектом фотостимулированного окисления является диссоциация окислителя в газовой фазе под действием фотонов с энергией выше 5 эВ с появлением атомарного кислорода, который, реагируя с молекулярным кислородом, образует озон. Молекулы озона, адсорбируясь на горячей поверхности подложки, диссоциируют на молекулярный и атомарный кислород. Последний, вследствие меньших размеров, быстрее достигает границы Si–SiO₂ и эффективнее встраивается в решетку окисла, что приводит к увеличению скорости роста диоксида кремния [10]. В спектре широко применяемых для БТО галогенных или ксеноновых ламп доля фотонов с энергией свыше 5 эВ мала, поэтому концент-

рацией атомарного кислорода в атмосфере окислителя можно пренебречь. Напротив, использование эксимерных источников со спектром излучения, смещенным в коротковолновую область, привело к существенному повышению концентрации атомарного кислорода и озона в атмосфере окислителя, влияние которых на процесс роста диэлектрика показано в работах [10, 16]. При доле озона 3–4% в среде сухого кислорода наблюдалось увеличение скорости роста окисла на 300, 250 и 50% для температур 600, 800 и 950°C, соответственно, по сравнению с обычным термическим окислением.

Предполагается, что ускорение роста окисла связано с наличием атомарного кислорода на границе Si–SiO₂, образующегося при диссоциации адсорбированных молекул озона на горячей поверхности подложки. При этом в области низких температур, когда молекулярный кислород слабо реагирует с кремнием (энергия активации реакции $E_a \approx 1,7$ эВ [5, 10]), атомарный кислород эффективно участвует в образовании окисла ($E_a \approx 0,22$ эВ [10]), а при повышении температуры начинает преобладать реакция обычного термического окисления. При применении других газов в качестве добавок к атмосфере кислорода необходимо также учитывать явления их диссоциации, в некоторых случаях протекающих более интенсивно (H₂ – ~4,5 эВ; HCl – ~4,4 эВ; NH – ~4 эВ; HBr – ~3,8 эВ; CO – ~3,7 эВ; NF – ~3 эВ) в диапазоне длин волн 250–400 нм [16] (рис. 3).

Поток света, пройдя через атмосферу окислителя, достигает системы Si–SiO₂, где часть излучения поглощается, приводя к нагреву кремниевой подложки [12, 25]. В общем случае, поглощение зависит от степени легирования подложки и энергии фотонов и характеризуется следующими основными видами – на свободных носителях, собственное, на ионизированных состояниях [26, с. 465].

Преобладание различных видов поглощения для подложек с различной проводимостью на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм в области температур 400–900°C наблюдалось в работе [27]. Для низколегированных кремниевых пластин в этом диапазоне температур на длине волны 1,55 мкм преобладало поглощение на свободных носителях заряда, а при 1,3 мкм – собственное. Это, вероятно, оказывает влияние на характер идущих в кремнии фотохимических процессов и, следовательно, на формирование диоксида кремния, что наиболее ярко наблюдается при облучении системы Si–SiO₂ коротковолновым оптическим излучением [15, 16, 28]. В работе [15] участок термически окисляемого образца кремния освещался лазером с перестраиваемой длиной волны 514 и 488 нм, при этом наблюдалось увеличение скорости роста оксида на 20% (514 нм) и на 25% (488 нм). Изменение мощности излучения лазера также ускоряло рост окисла. Было обнаружено, что увеличение скорости окисления зависит от уровня легирования подложки, кроме того, для пластин *p*-типа этот эффект максимален, а для *n*-типа минимален.

При облучении наблюдалось изменение плотности поверхностных состояний на границе раздела "окисел – полупроводник" и накопление отрицательного заряда в пленке диоксида кремния – как предполагается, за счет надбарьерной инжекции электронов из Si–SiO₂ [28]. В этом случае образование заряженных атомарных или

молекулярных частиц кислорода в пленке окисла идет за счет перехода электронов из зоны проводимости (ЗП) кремния в ЗП SiO₂ и последующей реакции с молекулярным кислородом. При этом электронам необходимо преодолеть барьер высотой порядка 3,15 эВ [17, 26] (рис. 4). Но наиболее вероятной является эмиссия электронов в переходный слой SiO_{*x*}, находящийся между Si и SiO₂ и связанный с перестройкой кристаллической структуры кремния в структуру SiO₂. Толщина SiO_{*x*} лежит в пределах от нескольких ангстрем до 3 нм в за-

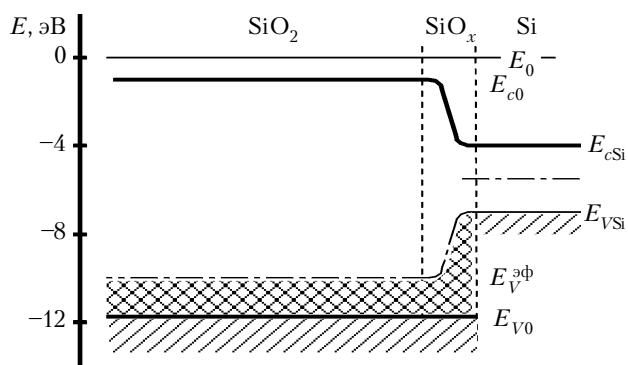
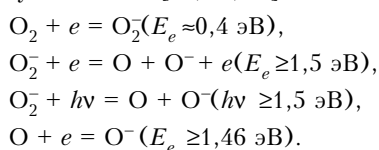


Рис. 4. Зонная диаграмма структуры SiO₂–Si: E₀ – уровень вакуума; E_{c0} – уровень зоны проводимости окисла; E_{csi} – уровень зоны проводимости кремния; E_{vsi} – уровень валентной зоны кремния; E_{v^{эф}} – эффективный валентный уровень; E_{v0} – уровень валентной зоны окисла; SiO_{*x*} – окисел с переменным составом [26]

висимости от предыстории и толщины окисла [9]. Величина барьера между ЗП Si и ЗП SiO_{*x*} менее 1 эВ, поэтому фотоэмиссия электронов из кремния в область переходного слоя будет эффективной. В этих условиях слой SiO_{*x*} будет насыщен свободными носителями зарядов, которые могут быть захвачены на положительно заряженные ловушки и вступать в реакцию с молекулярным кислородом, учитывая энергии сродства к электрону (E_e) 1,46 и 0,4 эВ для O и O₂, соответственно, по следующей схеме [10, 15, 17]:



Движение заряженных частиц окислителя к межфазной границе Si–SiO_{*x*} обусловлено градиентом концентрации и дрейфом под действием электрического поля объемного заряда. Таким образом, как и в случае диссоциации молекулярного кислорода в газовой фазе, к границе раздела Si–SiO₂ подходит атомарный кислород и вступает в реакцию с кремнием с образованием диоксида кремния. Эта реакция протекает в области температур ниже 800–850°C более эффективно, чем стандартная реакция [15, 17].

При анализе фотостимулированных реакций необходимо учитывать концентрацию и глубину проникновения электронов в диэлектрик, а также скорость диффузии атомарного кислорода к границе раздела Si–SiO₂.

Растущий окисел на поверхности кремния также влияет на поглощение излучения подложкой. Наличие диэлектрической пленки способствует измене-

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Таблица 1

Плотность поверхностных состояний N_{SS} (10^{10} эВ⁻¹см⁻²)

Условия окисления пленки толщиной 20 нм	Без отжига	Быстрый термический отжиг в N ₂			
		1000°C		1050°C	
		10 с	30 с	10 с	30 с
БТО 1050°C	9,7	1,4	1,2	1,3	< 1,0
БТО 1150°C	11,7	1,3	< 1,0	< 1,0	1,6
Печь 900°C	7,4	2,3	1,7	1,0	< 1,0

Таблица 2

Тип диэлектрика (толщина, Å)	$E_{пр}$, МВ/см	I , А/см ² ($E_{пр} \approx 8$ МВ/см)	N_{SS} , эВ ⁻¹ см ⁻²	U_{FB} , В	Источник
I (90)	—	—	$1,6 \cdot 10^{10}$	-0,95	[6]
I (110)	—	—	$7,8 \cdot 10^{10}$	-1	
I (148)	—	—	$8,3 \cdot 10^{10}$	-1,57	
I (315)	—	—	$9,9 \cdot 10^{11}$	-2,5	
I (104)	7,2	$\sim 10^{-11}$	—	—	[14]
II (99)	6,25	$\sim 10^{-9}$	—	—	
I (200)	~8,5	—	—	—	
II (250)	~6,5	—	—	—	
II*(250)	12	$\sim 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{11}$	—	[29]
I(60–160)	12–15,8	$2 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{10}$	-0,23	[7]
II(60–160)	6–9	—	$7 \cdot 10^{10}$	-0,45	

* — пленки, полученные обычным термическим способом, но прошедшие отжиг в условиях БТО.

нию коэффициента поглощения излучения в подложке на 10–30% благодаря просветляющему эффекту на границе раздела Si–SiO₂. Это требует учета коэффициента преломления кремния и диоксида кремния, толщины пленки и длины волны излучения [25]. Поглощение излучения диоксидом кремния в области длин волн 200–6000 нм незначительно. Оно определяется наличием примесных центров в запрещенной зоне SiO₂ и составляет 0,01% от поглощения кремния. В процессе окисления поглощение излучения пленкой возрастает за счет наличия в ней молекул или атомов кислорода, а также свободных электронов, пришедших из кремния. Собственным поглощением диоксида кремния можно пренебречь, т. к. оно соответствует энергии связи Si–O, равной ~9 эВ [26].

Электрофизические параметры тонких пленок диоксида кремния, полученных методом БТО

В большинстве случаев качество полученного диэлектрика оценивается по следующим параметрам: заряд поверхностных состояний Q_{ss} Кл·см⁻²; плотность поверхностных состояний N_{SS} см⁻²эВ⁻¹; напряжение плоских зон U_{FB} В; величина поля пробоя $E_{пр}$ МВ/см. Изменение этих параметров напрямую связано со структурой, фазовым составом полученной пленки.

Различие оборудования для БТО, разнообразие технологических подходов к формированию качественного окисла затрудняет анализ экспериментальных данных. Одним из примеров служит раз-

личие в скорости нагрева и охлаждения кремневых пластин в процессе термообработки, что определяет механические напряжения в пленке диоксида кремния, свойства переходной границы раздела Si–SiO₂ и др. Эти параметры технологического процесса указываются сравнительно редко. Поэтому критерием отбора для обзора электрофизических параметров тонких пленок являлись окислы, сформированные в сухом кислороде.

Наиболее типичные результаты влияния БТО на характеристики тонких пленок представлены в работе [2], результаты которой сведены в табл. 1.

Напряжение плоских зон U_{FB} для окислов, полученных методом БТО, варьировалось в пределах от -0,34 до -0,39 В.

В табл. 2 собраны экспериментальные данные (I — окисление методом БТО, II — обычное термическое окисление) из различных источников.

Из таблиц видно, что тонкие окислы, полученные методом БТО, не уступают пленкам, сформированным обычным термическим окислением. Следует учесть, что развитие технологии быстрой термообработки идет очень интенсивно, и качество окислов постоянно повышается.

Таким образом, получение качественного подзатворного диэлектрика методом БТО связано с контролем всех технологических этапов окисления и оптимальным выбором оборудования — источников излучения. Варьируя их параметры, можно изменить прохождение фотостимулированных реакций, добиваясь нужной скорости роста и приемлемых параметров формируемого диэлектрика. Возможность снижения температуры окисления делает метод БТО перспективным для применения в низкотемпературной технологии создания современных СБИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Chiou Y. I., Sow C. H., Li G., Ports K. A. Growth characteristics of silicon produced by rapid thermal oxidation processes // Appl. Phys. Lett.— Vol. 57, N 9.— 1990.— P. 881–883.
- Yoshiyuki Sato, Kazuhide Kiuchi. Oxidation of silicon using lamp light radiation // J. Electrochem. Soc.— 1986.— Vol. 133, N 3.— P. 652–654.
- Светличный А. М., Сеченов Д. А., Агеев О. А. Поляков В. В. Установка импульсной термообработки ИТО-18М // Электронная промышленность.— 1990.— № 3.— С. 62–64.
- Сеченов Д. А., Светличный А. М., Поляков В. В., Агеев О. А. Вакуумная установка импульсной термической обработки ИТО-18МВ // Там же.— 1991.— № 3.— С. 6–7.
- Massoud Z. Hislam, Plummar D. James. Analytical relationship for the oxidation of silicon in dry oxygen in

the thin-film regime // J. Appl. Phys.- 1987.- Vol. 62, N 8. - P. 3416-3423

6. Slaoui A., Popon J. P., Siffert P. Characterization of thin silicon oxide obtained by lamp heating // Appl. Phys.- 1987.- Vol. A. 43.- P. 301-304.

7. Румак Н. В. Система кремний-двуокись кремния в МОП-структурах. - Минск: Наука и техника, 1986.

8. Fukuda H., Arakawa T., Ohno S. // J. Electrochem. Soc.- 1992.- Vol. 39, N 1.- P. 127-133.

9. Fukuda H., Uchiyama A., Hayashi T. et al. // J. Appl. Phys.- 1990.- N 29.- P. 137-140.

10. Kazor A., Gwilliam R., Boyd Ian W. Growth rate enhancement using ozone during rapid thermal oxidation of silicon // Appl. Phys. Lett.- 1994.- Vol. 65, N 4.- P. 412.

11. Wrixon R., Twamey A., O'Sullivan P., Mathewson A. Enhanced thickness uniformity and electrical performance of ultrathin dielectrics growth by RTP using various N₂O-oxinitridation processes // J. Electrochem. Soc.-1995.- Vol. 142, N 8.- P. 2740 - 2742.

12. Антонетти П., Антониадис Д., Даттон Р., Оулдхем У. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов. - М.: Радио и связь, 1988. - С. 44 - 74.

13. Cosway G. Richard, Hodel W. Michael. Effect RTA on thin thermal oxide // J. Electrochem. Soc.- 1988.- Vol. 135, N 2.- P. 533-534.

14. Singh R., McCruer N. E., Rajkanan K., Weiss J. H. Rapid isothermal processing // J. Vac. Sci. Technol. A.- 1988.- Vol. 6, N 8. - P. 1480 - 1483.

15. Young E. M., Tiller William A. Electron population factor in light enhanced oxidation of silicon // Appl. Phys. Lett.- 1987.- Vol. 50(1).- P. 46-48.

16. Ian W. Boyd. Ultraviolet induced mechanisms in oxide film formation // Appl. Surf. Sci.-1997.- Vol. 109/110.- P. 538-543.

17. Kazor A. Space-charge diffusion model for rapid thermal oxidation of silicon // J. Appl. Phys.- 1995.- Vol. 77.- P.1477.

18. Deal B. E., Grove A. S. General relationship for the thermal oxidation of silicon // J. Appl. Phys.- 1965.- Vol. 36, N 12.- P. 3770.

19. Сеченов Д. А., Светличный А. М., Соловьев С. И., Агеев О. А. Влияние скорости нагрева на возникновение термонапряжений в кремниевой пластине при быстрым отжиге // Физика и химия обраб. мат-лов.- 1992.- № 5.- С. 46-52.

20. Сеченов Д. А., Светличный А. М., Агеев О. А., Клово А. Г. Моделирование температурных полей в полупроводниковых структурах при быстром термическом отжиге // Там же.- 1994.- № 2.- С. 33-38.

21. Сеченов Д. А., Светличный А. М., Соловьев С. И., Агеев О. А. Моделирование нагрева полупроводниковых структур лазерным излучением // Там же.- 1995.- № 2.- С. 109-114.

22. Маслов В. П., Данилов В. Г., Волосов К. А. Математическое моделирование процессов тепло-массопереноса. - М.: Наука, 1987.

23. Мазинг О. В., Петросянц Е. О. // Зарубежная электронная техника.- 1989.- № 1.- С. 3-39.

24. Massoud Hislam Z., Plammer James D., Irene Eugene A. Thermal oxidation of silicon in dry oxygen // J. Electrochem. Soc.- 1985.- Vol. 132, N 7.- P. 1746-1753.

25. Борисенко В. Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве.- Минск: Наука і тэхніка, 1992.

26. Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников.- Киев: Наукова думка, 1987.

27. Sturm C. James, Reaves M. Casper. Silicon temperature measurement by infrared adsorption: fundamental processes and doping effects // IEEE transactions on electron devices.- 1992.- Vol. 39, N 1. - P. 81-88.

28. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников.- Томск: Радио и связь, 1990.

29. Lee S. K., Shih D. K., Kwong D. L. et al. Effects of rapid processing on thermal oxides of silicon // Mat. Res. Symp. Proc. - 1986.- Vol. 71. - P. 449-454.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

➤ Электрофизические характеристики структур Si-X-Ge₃₃As₁₂Se₃₅ (X:Sb, Bi, In, Pb). А. Б. Кондрат, Н. И. Довгошей, Я. М. Поляк, Ю. Й. Сидор, Р. М. Повч (Украина, г. Ужгород)

➤ Теоретические аспекты оптимизации металлических токосъемных контактов солнечных элементов. П. В. Горский, И. М. Раренко, А. Ф. Ляшенко, А. И. Тимчук (Украина, г. Черновцы)

➤ Физико-технические основы построения инерциального датчика для измерения переносных по- ступательных ускорений и угловых скоростей ЛА на основе вибрирующих и вращающихся линейных акселерометров. Н. Г. Черняк, Н. А. Мухоед (Украина, г. Киев)

➤ Установка для выращивания малодислокационных монокристаллов арсенида галлия большого диаметра. Г. П. Ковтун, А. И. Кравченко, А. П. Щербань (Украина, г. Харьков)



➤ Однокристалльная микро-ЭВМ с аналого-цифровым преобразователем. В. Г. Вербицкий, Г. П. Липовецкий, П. В. Сивобород (Украина, г. Киев)

➤ Математическое моделирование нагрузочных характеристик оптимального термоэлектрического охладителя для фотоэлектрических приемников. Ю. Е. Николаенко, Л. М. Вихор (Украина, г. Киев)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции