

УДК 621.382.323

## ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ В МОП-ТРАНЗИСТОРАХ С НАНОМЕТРОВЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ

Екатерина Вадимовна Одинокова

*Студентка 3 курса,  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.Б. Цветков,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»,  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Тенденции современного развития электроники требуют все большего уменьшения размеров микросхем, а значит, уменьшения размеров транзисторов, являющихся, их основными элементами. Это обусловлено тем, что, во-первых, большее количество транзисторов на кристалле позволяет создать более многофункциональные и вместительные микросхемы, и, во-вторых, дает преимущество в «электрическом и энергетическом плане».

Одним из параметров миниатюризации транзисторов является толщина подзатворного диэлектрика. Она необходима для получения не только малых габаритов транзистора в целом, но и для его высочайшего быстродействия (заряженные частицы передвигаются быстрее через затвор, в результате чего такой МОП-транзистор может переключаться до 10 миллиардов раз в секунду). Другими словами, чем ближе затвор к каналу транзистора (то есть, чем тоньше диэлектрик), тем «большее влияние» в плане быстродействия он будет оказывать на электроны и дырки в канале транзистора.

Но, к сожалению, уменьшение толщины подзатворного диэлектрика ведет к заметному росту паразитного тока утечки затвора (из-за туннелирования электронов сквозь слой диэлектрика, которое экспоненциально растет с уменьшением толщины после значения в 1 нм (рис. 1)). Ток утечки, учитывая число транзисторов на кристалле, значительно повышает потребление и тепловыделение микросхемы.

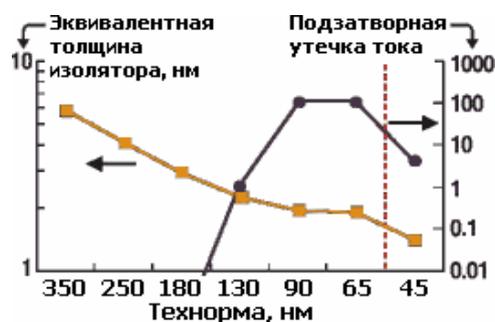


Рис. 1. График толщины подзатворного изолятора в SiO<sub>2</sub>-эквиваленте и относительной утечки тока

На протяжении 30 лет в качестве материала для диэлектрика затвора использовался диоксид кремния, обладающего технологичностью и возможностью улучшать характеристики транзисторов по мере уменьшения их размеров. В новейших транзисторах толщина слоя диоксида кремния составляет всего 1,2 нм, то есть 5

атомарных слоев. Это предел – дальнейшее утоньшение приведет к существенному росту тока утечек и избыточному тепловыделению микросхемы в целом. По оценкам экспертов в современных чипах почти 40% энергии теряется из-за утечек.

Подзатворный оксид (*gate oxide*), можно смоделировать как параллельную пластину конденсатора, удельная емкость  $C$  которой, обратно пропорциональна толщине подзатворного диэлектрика  $d$ :

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{t}$$

где  $k$  – показатель диэлектрической проницаемости;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая константа;

$A$  – площадь конденсатора.

То есть, чем меньше толщина  $t$  и больше параметр  $k$  тем транзистор потенциально быстрее. И поскольку дальнейшее утоньшение существующего диэлектрика  $\text{SiO}_2$  уже не представляется возможным, то требуется уделить внимание параметру  $k$ , другими словами, найти материал, у которого  $k$  больше чем у  $\text{SiO}_2$ .

Относительная диэлектрическая проницаемость  $k$  – безразмерная величина, разная для разных веществ, представляет собой отношение  $k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ , где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума, равная единице. Поскольку любой материал, по сравнению с вакуумом, способен поляризоваться, то у любого материала  $k > 1$ .

В микроэлектронике привычным значением  $k$  считается 3,9, что соответствует проницаемости диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), десятилетия использовавшегося в качестве боковых, межслойных и подзатворных изоляторов. Вещества с проницаемостью выше 3,9 относятся к классу *high-k* (высокопроницаемые), а ниже — к *low-k* (низкопроницаемые).

Низкопроницаемые материалы (*low-k*) нужны для межслойных и боковых диэлектриков, для того, чтобы лучше изолировать металлические дорожки межслойных соединений, избегая диэлектрического пробоя из-за слишком тонкого слоя изоляции между ними. Такие соединения обладают малой способностью поляризоваться под действием электрического поля и удерживать заряд.

Но сама изоляция должна быть тонкой, поскольку иначе невозможно подвести дорожки к уменьшающимся транзисторам, кроме того как сделав такими же малыми и проводники, и разделяющие их изоляторы.

Материалы *low-k* (низкопроницаемые):

- фторосиликатное стекло (*Fluorine-doped silicon dioxide* (F,  $\text{SiO}_2$ ))  $k = 3,5$ ;
- карбоносиликатное стекло (*Carbon-doped silicon dioxide* (C,  $\text{SiO}_2$ ))  $k = 3,0$ ;
- пористый диоксид кремния (*Porous silicon dioxide*)  $k \approx 2$ . Различными методами возможно получить пустоты (поры) в  $\text{SiO}_2$ , при этом их диэлектрическая проницаемость примерна равна 1. Таким образом, можно получить материал с параметром  $k$  меньше 2;
- нанокластерный кварц ( $\text{SiO}_2$ )  $k = 2,25$ ;
- органические полимеры  $k < 2,2$ ;

По идее, изолятор, разделяющий затвор и канал транзистора, должен подчиняться этим же требованиям, но на деле оказывается всё наоборот — тут нужен как раз высокопроницаемый диэлектрик, способный хорошо держать заряд.

В качестве новых материалов для подзатворного диэлектрика и затвора в будущих поколениях транзисторов (для техпроцесса менее 90 нм) в микроэлектронике было предложено сокращение *HKMG* — *High-k [dielectric and] Metal Gate*, то есть изолятор с высокой диэлектрической проницаемостью и металлический затвор.

Материалы *high-k* класса :

- силикат гафния  $\text{HfO}_4\text{Si}$ ;
- силикат циркония  $\text{ZrSiO}_4$ ;
- оксид гафния  $\text{HfO}_2$ , оксид циркония  $\text{ZrO}_2$ ;
- оксиднитрид кремния-гафния  $\text{HfSiON}$ .

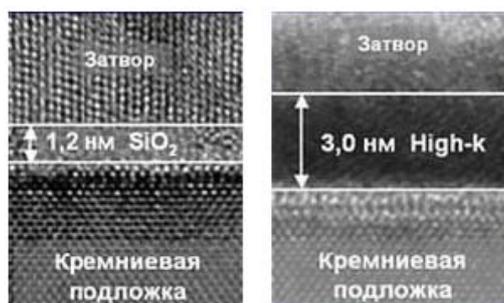


Рис. 2. Структура традиционного подзатворного диэлектрика (слева) и нового *high-k* диэлектрика (справа)

Высокопроницаемый диэлектрик позволяет электрическому полю затвора проникать на большую глубину или толщину, не снижая остальные электрические характеристики, влияющие на скорость переключения транзистора. При этом эти материалы могут иметь большую толщину, чем диоксид кремния, при сохранении тех же свойств. Так что, заменив оксид кремния на новый оксинитрид кремния-гафния ( $\text{HfSiON}$ ,  $k = 20 \dots 40$ ) толщиной в 3 нм (рис. 2), для процесса 45 нм удалось уменьшить утечки тока в 20...1000 раз. Для получения такой же скорости работы старый затвор пришлось бы делать толщиной в 1 нм. Диоксид кремния применяется в виде нижнего подзатворного слоя, но используется только как физический интерфейс для совместимости с текущими техпроцессами.

Табл. 1. Преимущества *high-k* диэлектрика по сравнению с  $\text{SiO}_2$

	<i>high-k</i> против $\text{SiO}_2$	Преимущество
Емкостное сопротивление	На 60% больше	Повышается быстродействие
Ток утечки	В 20-1000 раз меньше	Уменьшается тепловыделение

Но при замене диэлектрика (*high-k*) необходимо менять и материал затвора (*metal gate*) (рис. 3) – традиционный поликристаллический кремний на специальную комбинации металлов, из-за того, что дефекты на границе нового диэлектрика и поликремния затрудняют задание пороговых напряжений. Кроме того, наблюдается значительное снижение активности движения электронов через канал из-за возникновения так называемого поверхностно-оптического фонового режима и связанного с ним снижения эксплуатационных характеристик транзистора вследствие поляризации *high-k*-слоя и инверсии заряда материала канала.

Теперь ясно, почему эти две технологии идут парой. Однако новый затвор не алюминиевый, как это было в 60-х, а в виде сплава двух металлов. Его сопротивление ниже, что ускоряет переключение транзистора. Изначально было известно лишь то, что сплав отличается для р- и n-канальных транзисторов, причём компания *Intel*, которая первой всё это применила, держит оба состава в строгом секрете.

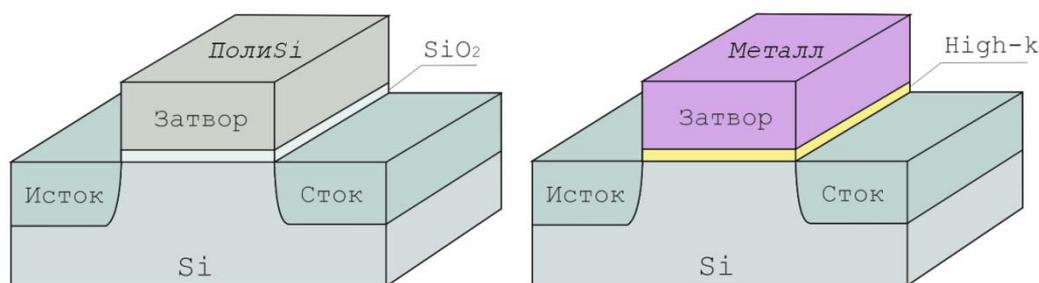


Рис. 3. Стандартный кремниевый транзистор (слева) и транзистор с изолятором с высокой диэлектрической проницаемостью и металлическим затвором (справа)

До сих пор использованию металлов мешал тот факт, что после имплантации примесей пластина проходит отжиг при температуре 900...1000 °С, что выше температуры плавления многих металлов (включая алюминий) и сплавов, но не поликремния. Хотя даже и без плавления при повышении температуры металл может диффундировать в подлежащие слои. Вот почему точная формула сплавов держится в секрете — сложно подобрать требуемый по свойству материал. Приходится применять всё более экзотические материалы — например, *Panasonic* легирует сплав для *n*-каналов своих *HKMG*-транзисторов редкоземельным элементом лантаном.

На данный момент в лабораторных условиях созданы высокоэффективные *p*- и *n*-типа транзисторы со стеками, полученными по технологии «*high-k/металл*» (рис. 4). Эти транзисторы обладают длиной затвора равной 80 нм и толщиной слоя диэлектрика примерно 1,4 нм. Транзисторы обоих типов показывают очень высокую эффективность при установке соответствующего порогового напряжения и имеют хорошую управляемость характеристик канала.

Следует отметить, что сочетание *high-K*-диэлектриков с металлическим материалом затвора — не единственное нововведение. В транзисторах нового поколения используется технология напряженного, или растянутого, кремния (*Strained Silicon Technology*) — (рис. 5). При миниатюризации транзисторов и уменьшении площади их сечения возрастает сопротивление электрическому току, который проходит через транзистор. В результате тепловыделение увеличивается, а транзистор «срабатывает» гораздо медленнее, чем хотелось бы.

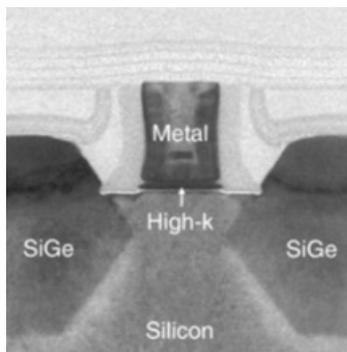


Рис. 4. Структура МОП-транзистора *p*-типа с *HKMG*

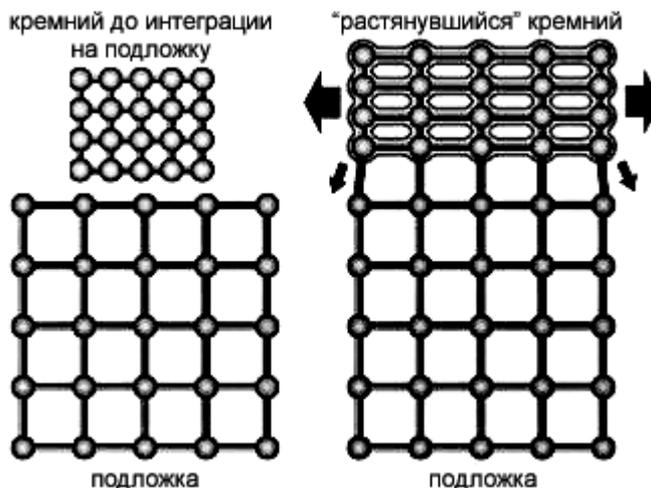


Рис. 5. Кремний до и после осаждения на кремний-германиевый слой

Для решения данной проблемы применяется напряжённый кремний (*strained silicon*) — формируется слой кремния для канала, в котором расстояние между атомами (как минимум в направлении исток-сток) не равно естественному шагу кристаллической решётки (0,543 нм). Для большего шага сначала внедряется «посевной» слой кремния-германия SiGe (рис. 5). Кристалл германия имеет шаг атомов 0,566 нм (именно из-за большей подвижности носителей заряда его первым стали применять в электронике). Смешанный полупроводник сохраняет это значение, даже если доля германия всего 17% (это для 90 нм; а для 32 нм — уже 40%). Осаждаемые поверх атомы кремния межатомными силами крепятся к атомам широкой решётки и остаются с её шагом, формируя затвор. Разряжение атомов увеличивает подвижность электронов, что ускоряет транзистор на 20...30%.

Другими словами, кристаллическую решетку «растягивают» (рис. 5), чтобы увеличить расстояние между атомами и облегчить протекание тока (рис. 6).

Создание напряжений в пространственной решетке — таких, чтобы атомы кремния находились друг от друга на расстоянии чуть большем, чем их естественное расстояние, — приводит к ускорению переключений транзисторов *n*-типа (так же, как сжатие пространственной решетки приводит к аналогичному эффекту для транзисторов *p*-типа). Это «растяжение/сжатие» именуют напряжением.



Рис. 6. Путь электрона сквозь обычный и напряженный кремний

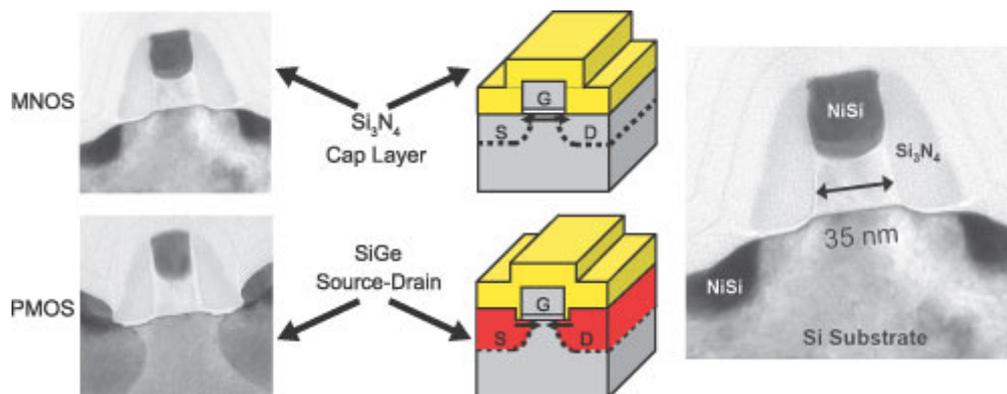


Рис. 7. Технология напряженного кремния: транзистор *n*-типа(сверху) и транзистор *p*-типа(снизу)

В транзисторах *n*-типа (рис. 7) поверх транзистора в направлении движения электрического тока наносится слой нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), вследствие чего кремниевая кристаллическая решетка «растягивается». В устройствах *p*-типа (рис. 7) это достигается за счет нанесения слоя SiGe в зоне образования переносчиков тока — здесь решетка «сжимается» в направлении движения электрического тока, а потому «дырочный» ток течет свободнее. В обоих случаях прохождение тока значительно облегчается: в первом случае — на 10 %, во втором — на 25 %, а соединение обеих технологий дает 20...30%-ное ускорение тока.

Подводя итог, можно сказать, что для дальнейшего продвижения по пути уменьшения параметров транзистора нужны новые решения. Проведенный анализ существующих и новых материалов, используемых в МОП-транзисторах, показал, что перспективными материалами для изготовления элементов транзистора размерами менее 90 нм являются увеличивающие быстродействие и уменьшающие энергопотребление соединения: напряженный кремний, материал с высокой диэлектрической проницаемостью (*high-k*), диэлектрик с низкой диэлектрической проницаемостью (*low-k*).

### Литература

1. Дьяконов В. П. Intel. Новейшие информационные технологии. Достижения и люди. М.: СОЛОН-Пресс.- 2004.- 416 с.
2. Куреев В. Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. – М.:ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 432 с.
3. Huff, H.R., Gilmer, D.C. (Ed.) *High Dielectric Constant Materials : VLSI MOSFET applications* Springer ISBN 3-540-21081-4 (2005)
4. Robertson, J. "High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors" *Institute Physics Publishing High dielectric constant gate oxides (Rep. Prog. Phys.* **69** 327-396 2006)
5. <http://www.nanonewsnet.ru>