

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ И СТРУКТУРА ОКИСНЫХ СЛОЕВ ТОЛЩИНОЙ МЕНЕЕ 50 АНГСТРЕМ

Вуль А. Я., Макарова Т. Л., Осипов В. Ю.,
Зинчик Ю. С., Бойцов С. К.

Исследована кинетика низкотемпературного термического окисления кремния *n*- и *p*-типа проводимости ориентации (100).

Обнаружена аномальная, т. е. имеющая отрицательную скорость роста, кинетика образования окисных слоев толщиной $d < 50 \text{ \AA}$. Параллельные измерения параметров слоев эллипсометрическим методом и методом оже-анализа показали, что процесс роста термического окисла сопровождается деструкцией естественного окисного слоя, всегда присутствующего на поверхности кремния; при этом свойства границы раздела термический окисел—кремний с некоторого этапа процесса соответствуют свойствам границы раздела Si—SiO₂. Исследования кинетики роста позволили установить, что для получения совершенных сверхтонких окисных слоев необходимо перед выращиванием термического окисла удалить естественный оксидный слой. Фотоэлектрические и оптические характеристики структур поликристаллический кремний *p*-типа проводимости—SiO₂—*p*-Si с окислом, выращенным с учетом этого условия, показали, что проводимость окисных слоев с толщиной $d < 35 \text{ \AA}$ носит туннельный характер и величина потенциального барьера для дырок на границе Si—SiO₂ составляет 2.2—3.0 эВ.

Введение. Интерес к исследованию МДП диодов, т. е. структур металл—диэлектрик—полупроводник с толщиной диэлектрического слоя менее 50 Å, в которых нельзя пренебречь его проводимостью, возник более 20 лет назад и был связан вначале с изучением механизмов токопрохождения, в особенности туннелирования [1, 2]. В последние годы интерес к исследованию такого рода структур с проводящим диэлектриком (МТДП структур) обусловлен рядом обстоятельств. К ним можно отнести: необходимость уменьшения толщины подзатворного диэлектрика в кремниевых полевых транзисторах в связи с уменьшением длины канала до субмикронных размеров в современных интегральных схемах [3], разработку МДП транзистора с туннельным эмиттером [4], возможность создания на основе МДП диодов высокоэффективных фотопреобразователей и фотоприемников [5, 6].

Основным вопросом технологии создания МТДП структур является получение сверхтонких диэлектрических слоев двуокиси кремния со стабильными и воспроизводимыми параметрами. Несмотря на большое количество работ, посвященных этой проблеме [7, 8], значительный круг вопросов остается малоизученным, в особенности это касается кинетики низкотемпературного окисления.

В настоящей работе излагаются результаты изучения оптическими методами начального этапа процесса формирования термического окисла на кремнии и приведены результаты исследования фотоэлектрических свойств кремниевых ПТДП (полупроводник туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник) диодов с толщиной диэлектрика менее 50 Å.

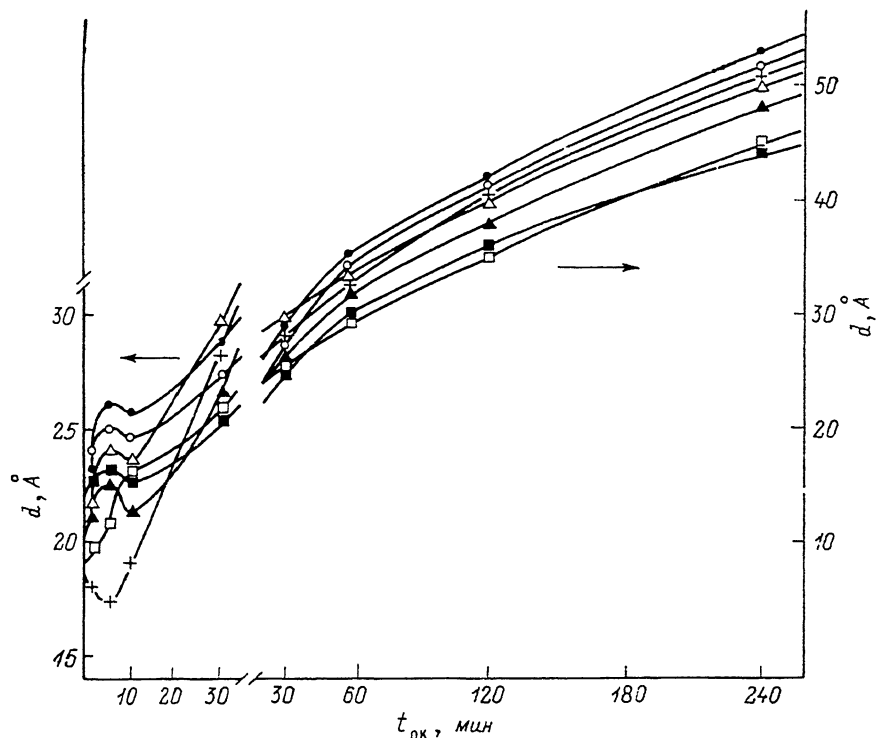


Рис. 1. Кинетика окисления структур различных серий.

Одинаковые значки относятся к образцам одной серии, отличающимся только временем окисления. Для наглядности начальный участок показан в увеличенном масштабе.

1. Изготовление образцов и методика эксперимента

Предназначенные для исследования окисные слои толщиной менее 50 Å выращивались на подложках монокристаллического кремния *p*- и *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением от 1 до 700 Ом·см, ориентированных в плоскости (100). Перед выращиванием окисного слоя для удаления с подложек верхнего слоя кремния, нарушенного в процессе полировки, проводилось термическое окисление поверхности кремния до образования слоя SiO₂ толщиной около 5000 Å с последующим его удалением и стандартными операциями химической очистки, промывки и осушки. Формирование исследуемого окисного слоя ($d < 50$ Å) проводилось в потоке сухого кислорода при температуре 700 °С. Были исследованы семь серий образцов, каждая из которых состояла из семи структур Si—SiO₂, выращенных на идентичных подложках и отличавшихся временем окисления (рис. 1).

Определение толщины и оптических свойств выращенного окисного слоя проводилось эллипсометрическим методом на приборе ЛЭФ-3М. Кроме стандартного источника излучения этого прибора — лазера с длиной волны $\lambda = 6238$ Å, эллипсометрические параметры структур для исключения возможных погрешностей измерялись в некоторых случаях на том же приборе, но с использованием аргонового лазера с длиной волны излучения $\lambda = 4880$ Å. Поскольку коэффициент экстинкции кремния возрастает при этом от значения $k = 0.02$ до $k = 0.1$, измерения на двух длинах волн позволили снизить влияние оптического поглощения в объеме кремния на результаты измерений.

Измерения эллипсометрических параметров проводились сразу после окончания процесса окисления и через месяц. Совпадение полученных данных с точностью до $\delta\psi=1'$, $\Delta=10'$ (ψ и Δ — амплитудный и фазовый эллипсометрические параметры [9]) говорит, с одной стороны, о стабильности полученных окислов, а с другой — может служить свидетельством достоверности эллипсометрических результатов.

В исследованных структурах изотипных ПТДП диодов *p*-кремний— SiO_2 —*p*-поликристаллический кремний окисный слой выращивался описанным выше способом, а слой поликремния наносился методом разложения моносилана и был легирован бором в процессе роста до концентрации $(2-5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Толщина слоя поликремния составляла 0.35 мкм, диаметр фоточувствительной площадки — 6 мм. Контактom к слою поликремния служил кольцевой алюминиевый электрод. Подробно геометрия ПТДП диодов и методика измерения их фотоэлектрических параметров были описаны ранее [10, 11].

2. Результаты эксперимента

2.1. *Кинетика роста окисного слоя.* Как видно из рис. 1, процесс низкотемпературного окисления можно разделить на три стадии: увеличение толщины существовавшего на подложке естественного окисла на 3—6 Å в первую минуту, постоянство и даже уменьшение толщины окисла на протяжении следующих 30 мин процесса, последующий монотонный рост толщины окисла.

Из параллельного рассмотрения данных оже-анализа (рис. 2) следует, что при временах окисления $t_{\text{ок}} < 30$ мин на второй стадии процесса, когда толщина диэлектрического слоя практически не возрастает, изменяется состав окисного слоя. Форма поверхностного оже-пика LVV-Si указывает на уменьшение вклада атомарного кремния с увеличением времени окисления.

Поскольку на поверхности кремния всегда присутствует естественный окисный слой, очевидно было предположить, что именно он оказывает определяющее влияние на кинетику начальных стадий окисления. Для проверки этого предположения была исследована кинетика окисления трех типов кремниевых пластин, отличающихся характером предварительной подготовки поверхности: промышленных кремниевых пластин с естественным окислом, об-

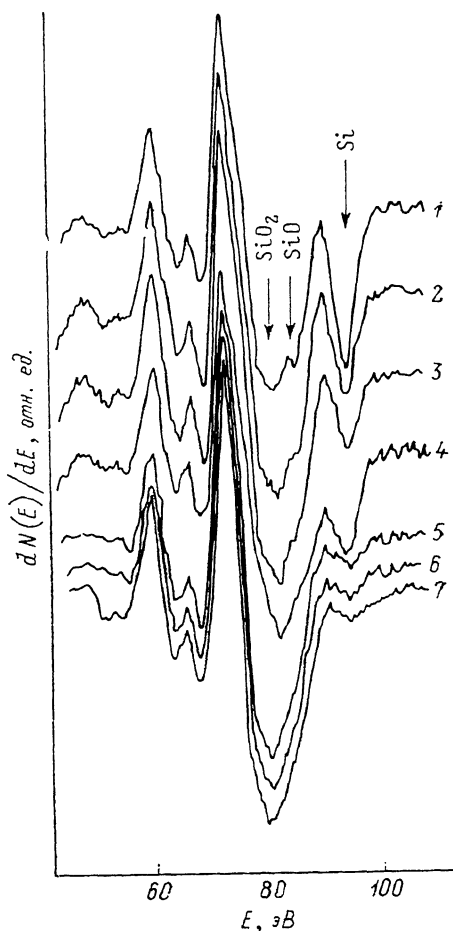


Рис. 2. Поверхностные спектры оже-электронов образцов одной из серии, отличающихся временем окисления.

$t_{\text{ок}}$, мин: 1 — 1, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 30, 5 — 60, 6 — 120, 7 — 240; толщина окисного слоя d , Å: 1 — 22, 2 — 26, 3 — 23, 4 — 24, 5 — 33, 6 — 46, 7 — 51.

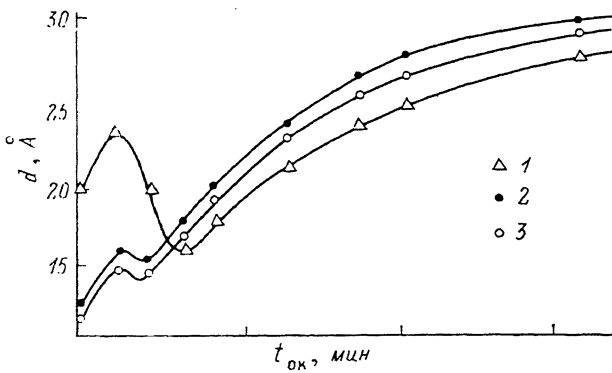


Рис. 3. Кинетика окисления образцов, отличающихся предварительной подготовкой поверхности.

1 — без предварительной обработки, 2 — со сравненным естественным окисным слоем, 3 — со специально выращенным и полностью стравленным термическим окисным слоем.

разовавшимся в результате длительного хранения; пластин со стравленным в плавиковой кислоте естественным окислом; пластин со специально выращенным и полностью стравленным толстым ($d=5000 \text{ \AA}$) термическим окислом. Поскольку вся обработка проводилась на воздухе, два последних типа пластин также имели слой естественного окисла, однако его толщина не превышала 12 \AA .

Из результатов эксперимента, приведенных на рис. 3, видно, что на образцах всех трех типов начальная стадия процесса окисления происходит сходным образом — в первую минуту окисел увеличивается на $3-4 \text{ \AA}$. При этом последующее уменьшение толщины окисной пленки оказывается тем больше, чем большую толщину имел первоначальный естественный окисел. Сходство кинетики окисления пластин второго и третьего типов во всем диапазоне толщин указывает на то, что существование поверхностного слоя кремния, нарушенного в результате промышленной обработки пластин, не оказывает принципиального влияния на процесс окисления. Вместе с тем участок с отрицательной скоростью роста окисла (рис. 3, кривая 1) для пластин первого типа, на наш взгляд, говорит о деструкции на первой стадии окисления естественного окисла и может служить свидетельством существенного различия структуры естественных и термических окислов кремния.

Отметим, что уменьшение толщины окисла в процессе термического окисления было описано ранее (см. например, [7]), но при существенно больших (на порядок) толщинах. Авторы [7] объясняли такую отрицательную скорость роста аморфизацией субмикрористаллов кварца, протекающей с заполнением субмикропор в направлении, параллельном поверхности подложки. Заметим, однако, что в нашем эксперименте следует рассматривать другие механизмы, так как уменьшение окисного слоя происходит в диапазоне толщин $20-25 \text{ \AA}$ и сопровождается, как отмечалось (рис. 2), изменением его состава.

Качественные представления о природе отрицательной скорости роста окисного слоя оказывается возможным получить с помощью амплитудно-фазовой ($\psi-\Delta$) эллипсомерической номограммы (рис. 4, а), которая обычно используется для определения толщины и показателя преломления тонких пленок графоаналитическим методом [9]. Для структуры кремний—однородный по составу слой SiO_2 расчетная зависимость эллипсомерических параметров ψ и Δ от толщины пленки представляет собой монотонную кривую, соответствующую показателю преломления $n=1.46 (\text{SiO}_2)$ (рис. 4, а, кривая 1). Аналогичная кривая имеет место для иного состава окисла, например SiO ($n=2$; рис. 4, а, кри-

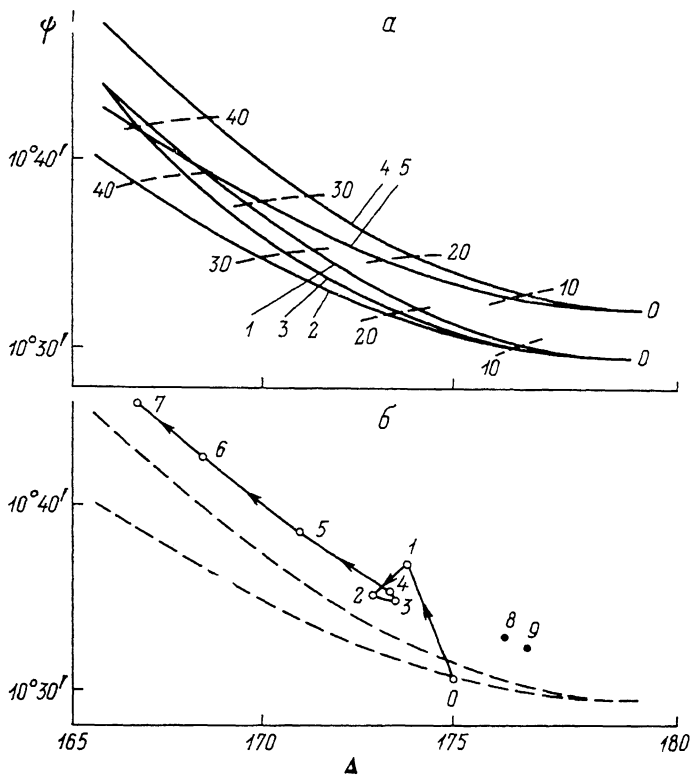


Рис. 4.

а — амплитудно-фазовая эллипсометрическая номограмма, рассчитанная для структур кремний-окисный слой (1—3) и кремний-слой аморфного кремния-окисный слой (4, 5). Штрихами показаны линии равной толщины окисного слоя. Параметры, использованные при расчете. Показатели преломления: кремний — $N=3.878-i \cdot 0.023$; аморфный кремний — $N=4.0-i \cdot 0.25$; двуокись кремния — $N=1.46$; моноокись кремния — $N=2.0$. Для кривых 4, 5 толщина аморфного кремния 10 Å. б — экспериментальная эллипсометрическая номограмма, штрихами показаны кривые 1 и 2 рис. 4, а. «О» — точка, соответствующая структуре с естественным окислом, точки 1—7 относятся к структурам с возрастающим временем окисления $t_{ок}$ (см. подпись к рис. 2). Точки 8 и 9 получены при измерении на свежепротравленной поверхности термического окисла.

вая 2). Кривые 1 и 2 ограничивают область значений параметров ψ и Δ для любых непоглощающих окисных слоев на кремнии толщиной до 50 Å. По мере роста толщины окисного слоя и связанного с ним изменения показателя преломления, отвечающего изменению состава слоя (в соответствии с данными оже-анализа, см. рис. 2), изменение эллипсометрических параметров должно описываться плавной кривой, лежащей в области разрешенных значений ψ и Δ (рис. 4, а, кривая 3). Упомянутая область может быть сдвинута в плоскости ψ - Δ как целое, если между кремнием и окислом находится переходный слой с отличными от Si и SiO₂ оптическими свойствами. Соответствующие теоретические зависимости (рис. 4, а, кривые 4 и 5) рассчитаны для структуры Si-аморфный кремний-окисел.

Обратимся к экспериментальной номограмме (рис. 4, б), отражающей основные закономерности, наблюдаемые при исследовании кинетики низкотемпературного окисления.

Видно, что при толщинах окисного слоя более 30 Å экспериментальные точки находятся вне области значений ψ и Δ , отвечающих простейшей модели кремний-окисный слой, но при этом ход зависимости повторяет кривую 1 (точки 5—7). Сопоставление с расчетом (рис. 4, а, кривая 4) позволяет сделать вывод о том, что в указанном интервале толщин структура содержит переходный слой

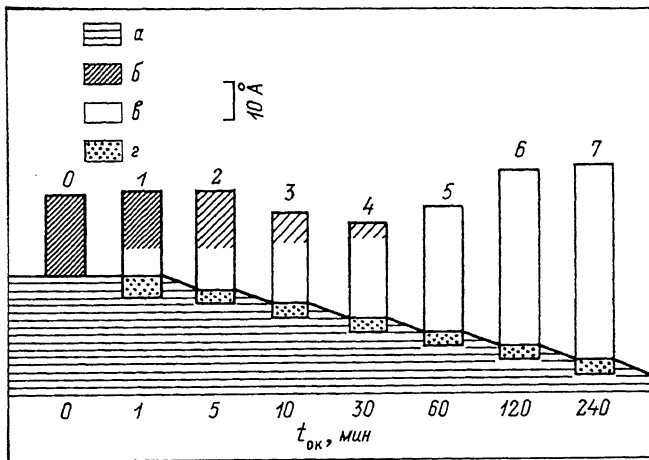


Рис. 5. Модель роста термического окисла на кремнии.

По оси ординат — толщина слоя в ангстремах в соответствии с указанным масштабом, по оси абсцисс — время окисления в минутах. Нумерация модельных структур соответствует нумерации экспериментальных точек рис. 4, б. а — кремний, б — естественный окисел, в — термический окисел, г — модифицированный (реакционный) слой кремния.

с параметрами, близкими к аморфному кремнию. Численные расчеты, аналогичные приведенным на рис. 4, а, позволили определить, что толщина переходного слоя $d=4 \text{ \AA}$.

Участок, на котором наблюдается уменьшение толщины окисла (отрицательная скорость роста), характеризуется сложным немонотонным поведением эллипсометрических параметров ψ и Δ . Это может быть связано с формированием переходного слоя и изменением структуры естественного окисла. Проанализируем кинетику роста окисного слоя толщиной менее 30 \AA более подробно.

Начальная точка на экспериментальной номограмме соответствует естественному окислу, являющемуся смесью различных окислов и кремния, и лежит на кривой $n=2$. Минутное окисление (точка 1) приводит к резкому возрастанию амплитудного коэффициента ψ , что можно интерпретировать как появление переходного слоя на границе раздела кремний—естественный окисел, общая толщина окисного слоя при этом возрастает на 6 \AA . Уменьшение ψ и Δ при дальнейшем окислении (точка 2) означает уменьшение толщины переходного слоя при слабом увеличении толщины окисного слоя. Дальнейшее перемещение точек по номограмме (от точки 2 к точке 3) указывает на уменьшение толщины окисного слоя при одновременном уменьшении его показателя преломления. Последнее означает, что отрицательная скорость роста соответствует изменению состава окисного слоя в сторону увеличения содержания двуокиси кремния. Такое изменение состава наблюдается и при больших временах окисления (точка 4) вплоть до образования сплошного слоя SiO_2 , отделенного от кремния переходным слоем аморфного кремния (точки 5—7).

Существование переходного слоя аморфного кремния подтверждается результатами измерений на свежепротравленных в HF структурах с окисным слоем толщиной $40\text{--}50 \text{ \AA}$, поскольку экспериментальные точки (рис. 4, б, точки 8, 9) укладываются на продолжение кривой, образованной точками 4—7. Наличие указанного слоя не противоречит и существующим в литературе представлениям о природе границы кремний—окисел [12].

Проведенный анализ позволяет представить себе кинетику начальных стадий окисления с помощью диаграммы, аналогичной [13] (рис. 5).

В первую минуту окисления (рис. 5, столбец 1) кислород проходит через слой естественного окисла, начиная образовывать под ним термический окисел. Одновременно на границе $\text{Si}-\text{SiO}_2$ формируется модифицированный (иначе называемый «реакционным» [13]) слой с оптическими параметрами, близкими к аморфному кремнию ($N=4.0-i\cdot 0.2$; $d=6 \text{ \AA}$). Через 5 мин после начала окисления (рис. 5, столбец 2) толщина переходного слоя уменьшается до $d=4 \text{ \AA}$. После окончания этой стадии окисления границу раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$ можно считать сформированной, что подтверждается далее измерениями электрических и фотоэлектрических характеристик ПТДП структур. Стабильность границы раздела при столь малых толщинах окисла обеспечивается за счет низкой температуры окисления благодаря насыщению кислородом разорванных валентных связей атомов кремния. При дальнейшем окислении скорость роста падает и даже может принимать отрицательные значения (рис. 5, столбцы 2—4). Это можно объяснить двумя факторами: во-первых, замедлением реакции окисления за счет уменьшения скорости диффузии кислорода через слой выросшего термического окисла к границе раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$, во-вторых, доокислением естественного окисного слоя до двуокиси кремния. Уменьшение общей толщины слоя, по-видимому, является следствием образования летучих веществ, например SiO . Через 60 мин после начала окисления (рис. 5, столбцы 5—7) оптические параметры окисного слоя соответствуют параметрам SiO_2 , неизменность формы оже-спектров говорит о стабильности состава окисного слоя (рис. 2, кривые 5—7).

Проведенный анализ приводит к выводу о том, что наличие естественного окисла является определяющим фактором, влияющим на кинетику начальных стадий низкотемпературного окисления. Эксперимент показал, что, минимизируя промежуток времени между удалением естественного окисла и началом процесса термического окисления, удастся устранить участок с отрицательной скоростью роста. Удаление естественного окисного слоя по технологии, описанной выше, и проведение процесса окисления при пониженной температуре позволили, как будет видно из дальнейшего, получить структуры с туннельно-прозрачными слоями диэлектрика.

2.2. *Фотоэлектрические свойства ПТДП диодов.* Вольт-амперные характеристики изготовленных структур $p^+-\text{Si}^*-\text{SiO}_2-p\text{-Si}$ имели диодный вид, при этом величина поверхностного изгиба зон φ_s^0 при нулевом смещении в структурах, как показали измерения вольт-фарадных характеристик [14], составляет 640—700 мВ (при $T=77 \text{ K}$) и соответствует обеднению поверхности основными носителями заряда. На рис. 6 приведены спектральные зависимости фотоэдс ПТДП диодов с различными толщинами слоя окисла, измеренные в диапазоне энергий 2.7—5.0 эВ. Видно, что изменение толщины окисла практически не влияет на характер спектра фотоэдс. Как следует из энергетической диаграммы, (см. вставку на рис. 6), фотоответ в области энергий фотонов $E_g(\text{Si}) < h\nu \leq \leq 2.9 \text{ эВ}$ обусловлен собственным поглощением в p -кремнии, при этом с ростом энергии кванта этот вклад падает в результате оптических потерь за счет поглощения излучения в поликремнии и увеличения поверхностной рекомбинации электронно-дырочных пар, фотогенерированных вблизи границы раздела $\text{SiO}_2-p\text{-Si}$. Увеличение фотоответа в области энергий фотонов $h\nu \geq 2.9 \text{ эВ}$ связано с фотоэмиссионным переходом дырок из p^+ -поликремния через диэлектрик (т. е. через валентную зону SiO_2) в p -кремний, что и позволяет определить высоту барьера Φ_b .

Экстраполяция спектральной зависимости в интервале 3.10—3.55 эВ в координатах Фаулера к нулевому значению фотоответа (см. вставку на рис. 6) дает величину 2.2 эВ, не зависящую от толщины окисла. Поскольку вклад в фотоответ от собственного поглощения в кремнии в интервале 2.5—2.95 эВ относительно велик, а в интервале 3.75—4.5 эВ наклон спектральной кривой в координатах Фаулера изменяется, диапазон 2.2—3.0 эВ является наиболее досто-

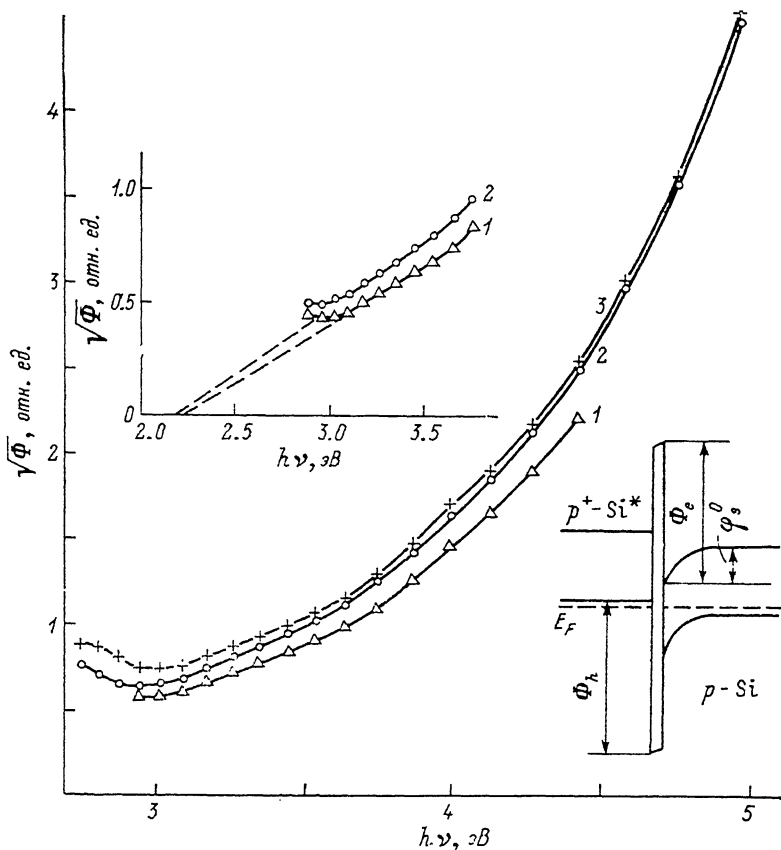


Рис. 6. Спектральная зависимость фотоэда ПТДП диодов, изготовленных на кремниевых подложках марки КДБ-15, при $T=293$ К.

Толщина окисла d , Å: — 20, 2 — 26, 3 — 33. На вставках показаны энергетическая диаграмма зонной структуры ПТДП диода и графическое определение величины барьера Φ_b . ϕ_s^0 — начальный поверхностный изгиб зон.

верным интервалом для определения величины Φ_b . В литературе приводятся различные экспериментальные данные о величине Φ_b . Так, в структурах с толщинами слоев $d > 70$ Å $\Phi_b \cong 4.6$ эВ, что соответствует значениям, приводящимся для «толстых» окисных слоев ($d=300-2000$ Å) [15]. В [16] приводится величина $\Phi_b=3.6$ эВ при $d=22.5$ Å, а по данным, представленным в [17], величина барьера для дырок изменяется от 1.0 до 1.36 эВ с ростом толщины окисла от 20 до 30 Å.

Заметим, что неоднородность окисного слоя по толщине (так называемые «проколы» [18], т. е. области с существенно меньшей, чем в среднем, толщиной диэлектрика) может приводить к возникновению фотоэда за счет перехода фотозвужденных дырок из p^+ -полукремния через окисел в p -кремний при энергиях кванта, меньших высоты барьера Φ_b . В том случае, если доля площади, занятая такими проколами, велика, определение величины Φ_b указанным методом было бы затруднительно, поскольку привело бы к уменьшению резкости спектральных кривых в координатах Фаулера. Поэтому сама возможность оптического определения величины Φ_b и ее близость к приводимым в литературе значениям свидетельствуют о достаточно высоком качестве сверхтонких окисных слоев.

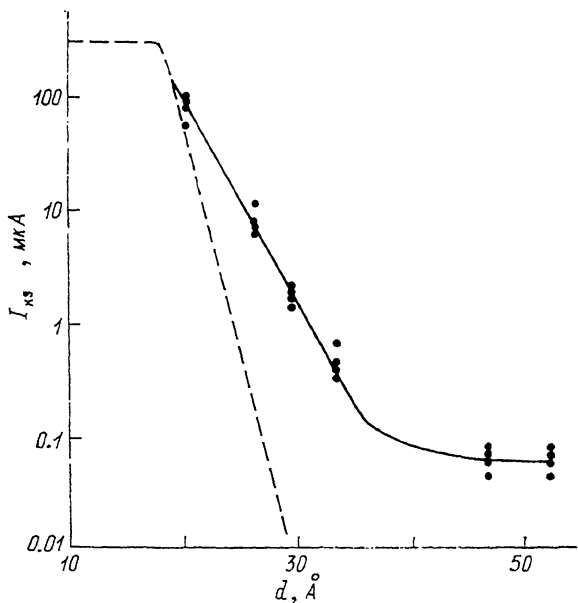


Рис. 7. Зависимость величины фототока короткого замыкания $I_{кс}$ от толщины окисла в ПТДП диодах.

Штрихами показана теоретическая зависимость [18].

О качестве окисных слоев можно судить и по значению толщины окисла, при котором оптические параметры достигают значения, соответствующего объемному SiO_2 ($n=1.465$). Так, в [19] показатель преломления изменялся до толщин $d=70-90$ Å, в нашем случае показатель преломления изменяется от $n=1.9$ до $n=1.465$ с ростом толщины окисла от 12 до 33 Å. Тот факт, что величина Φ_b практически не изменяется начиная с толщины $d=20$ Å (после 5 мин окисления, см. рис. 1), означает, что формирование границы раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$ происходит на расстоянии 4–5 атомных слоев, т. е. раньше формирования оптических свойств объемного SiO_2 .

На рис. 7 представлена экспериментальная зависимость фототока короткого замыкания ПТДП диодов $I_{кс}$ от толщины окисла при стационарном освещении структуры. Как известно, в ПТДП диодах до определенной критической толщины диэлектрика $d_{кр}$ не наблюдается падения фототока короткого замыкания, что связано с эффектом накопления [20]. В кремниевых ПТДП диодах $d_{кр}$, как показывают теоретические расчеты и ряд экспериментов [21, 22], не превышает 17–18 Å. Полученные нами экспериментальные данные, как видно из рисунка, дают близкое значение. Резкое уменьшение величины фототока с ростом толщины диэлектрика при $d > d_{кр}$ связано с уменьшением вероятности туннелирования фотогенерированных неосновных носителей заряда, т. е. пропорционально $\exp(-\sqrt{\Phi_n}d)$, где Φ_n — величина эффективного туннельного барьера для электронов. В то же время крутизна спада $I_{кс}$ с толщиной окисла в нашем случае меньше, чем следует из теории при $\Phi_n=3.2$ эВ [23].

Известные в литературе экспериментальные значения величины барьера Φ_n варьируются от 0.24 до 3.3 эВ (при $d=25$ Å) [24, 25]. Аномально низкие (менее 1.0 эВ) величины барьеров, определенные из электрических измерений, объясняются рядом причин, из которых главная связана с наличием упоминавшихся проколов, поскольку при наличии шунтирующих компонент электрического тока экспериментально определяемая из вольт-амперной характеристики тун-

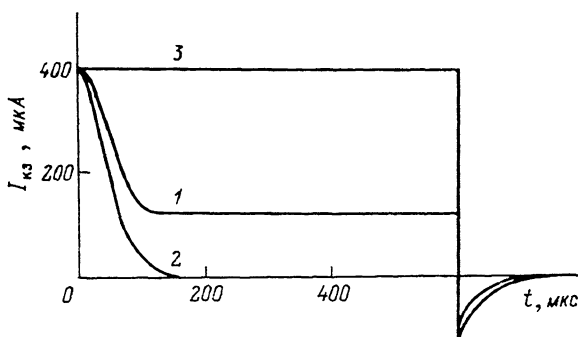


Рис. 8. Осциллограммы фототока короткого замыкания ПТДП диодов с различной толщиной окисла.

d , Å: 1 — 20; 2 — 26 при облучении прямоугольным импульсом излучения светодиода ($\tau \approx 600$ нс, $\lambda = 0.93$ мкм) при $T = 293$ К. Для сравнения показана осциллограмма фототока стандартного кремниевого фотодиода той же площади (3).

нельная прозрачность оказывается завышенной, а эффективная величина барьера для туннелирования соответственно заниженной при данной толщине окисла. Аналогично, заниженная величина барьера будет возникать и за счет туннельного тока через проколы с толщиной окисла $d < d_{кр}$. Ясно, что наличие шунтирующего тока через проколы может объяснить наблюдаемую в эксперименте меньшую, чем следует из теории, крутизну зависимости $I_{кз} = f(d)$.

Кинетика фототока ПТДП диодов в значительной степени определяется величиной туннельной прозрачности окисла и была рассмотрена ранее в [11, 26]. Качественно физические процессы, определяющие кинетику, можно пояснить следующим образом. При облучении структуры прямоугольным импульсом излучения из области собственного поглощения фотогенерированные в приповерхностной области p -кремния дырки и электроны разделяются полем области пространственного заряда (ОПЗ). При этом ток, обусловленный основными носителями — дырками, через внешнюю цепь заряжает p^+ -поликремниевый электрод. Неосновные фотогенерированные носители заряда — электроны движутся в противоположном направлении, и в первый момент происходит накопление отрицательного заряда у границы раздела SiO_2 — p -Si. Таким образом, вызванный в первый момент времени во внешней цепи ток осуществляет зарядку ПТДП конденсатора, и по мере зарядки величина тока релаксирует к постоянному уровню. Стационарный уровень тока определяется туннельной прозрачностью барьера для электронов, т. е. стационарный фототок короткого замыкания структуры представляет собой туннельный ток утечки заряженной емкости слоя диэлектрика.

На рис. 8 показаны осциллограммы фототока структур с толщиной окисла в 20 и 26 Å (кривые 1 и 2) при облучении прямоугольным импульсом собственного излучения. Резкое уменьшение стационарного уровня фототока при увеличении толщины окисла на 6 Å является еще одним свидетельством высокого качества сверхтонких окисных слоев. Следует обратить внимание на то, что резкое уменьшение величины стационарного фототока в кинетике полностью соответствует падению фототока короткого замыкания (рис. 7).

Таким образом, исследование оптических и фотоэлектрических характеристик окисных слоев, полученных при низкотемпературном ($T = 700$ °C) окислении кремния, показало, что кинетику начальных стадий роста определяют по меньшей мере три параллельных процесса: формирование реакционного слоя на поверхности кремния, рост термического окисла на границе раздела реакционный слой—естественный окисел, перестройка слоя естественного окисла. При этом формирование границы раздела происходит на расстоянии

4—5 атомных слоев, формирование оптических свойств объемного SiO_2 наблюдается при толщине диэлектрика более 34 Å. Удаление естественного окисного слоя перед процессом низкотемпературного окисления позволяет получить ПТДП структуры с туннельно-прозрачным диэлектриком.

Авторы выражают благодарность И. К. Ионовой за измерение оже-спектров, С. Н. Пятко за измерение фотоэдс в ультрафиолетовой области спектра, Л. В. Шароновой за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Gray P. V. // Phys. Rev. 1965. V. 140A. N 1. P. 179—194.
- [2] Shewchun J., Wakman A., Warfield G. // Sol. St. Electron. 1967. V. 10. N 8. P. 1169—1186.
- [3] Hung K. K. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. N 3. P. 816—823.
- [4] Chu K. M., Pulfrey D. L. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1988. V. 35. N 2. P. 188—193.
- [5] Shewchun J., Burk D., Spitzer M. B. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. V. ED-27. N 4. P. 705—724.
- [6] Вуль А. Я., Саченко А. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1361—1375.
- [7] Румак Н. В., Хатько В. В. Диэлектрические пленки в твердотельной микроэлектронике. Минск, 1990. 192 с.
- [8] Mott N. F. // Phil. Mag. 1988. V. B55. N 2. P. 117—129.
- [9] Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М., 1981. 584 с.
- [10] Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Зинчик Ю. С., Санин К. В. // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 3. С. 150—154.
- [11] Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Зинчик Ю. С., Санин К. В., Саченко А. В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 8. С. 1444—1450.
- [12] Aspnes D. E. // Surf. Sci. 1980. V. 101. N 1. P. 84—98.
- [13] Stoneham A. M., Jaros M. // Phil. Mag. 1987. V. B 55. N 2. P. 201—210.
- [14] Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Осипов В. Ю., Бойцов С. К., Зинчик Ю. С., Макарова Т. Л. // Тез. докл. XII Всес. конф. по физике полупроводников. Киев, 1990. Ч. 2. С. 131—132.
- [15] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 455 с.
- [16] Hsueh F. L., Faraon L., Simmons J. G. // Sol. St. Electron. 1984. V. 27. N 6. P. 499—505.
- [17] Ashburn P., Soerowirdjo B. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1984. V. ED-31. N 7. P. 853—860.
- [18] Chettopedhyay P., Daw A. N. // Sol. St. Electron. 1986. V. 29. N 5. P. 555—560.
- [19] Абессонова Л. Н., Жарких Ю. С., Евдокимов А. Д., Щеткин В. Н. // Тез. докл. IX Всес. симп. «Электронные процессы на поверхности и в тонких слоях полупроводников». Новосибирск, 1988. Ч. 1. С. 9—10.
- [20] Гуткин А. А., Седов В. Е. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 8. С. 1589—1591.
- [21] Shewchun J., Burk D., Spitzer M. B. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. V. ED-27. N 4. P. 705—716.
- [22] Shewchun J., Singh R., Green M. A. // Appl. Phys. 1977. V. 48. N 2. P. 765—770.
- [23] Ng K. K., Card H. C. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. V. ED-27. N 4. P. 716—724.
- [24] Dressendorfer P. V., Barker R. C. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 11. P. 933—935.
- [25] Chu K. M., Pulfrey D. L. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1988. V. 35. N 10. P. 1656—1663.
- [26] Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Зинчик Ю. С., Санин К. В., Саченко А. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1471—1477.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получена 6.08.1991
Принята к печати 9.08.1991