

06

Процессы токопереноса в тонких пленках оксидов лутеция и тербия на кремнии

© Я.Г. Федоренко, Л.А. Отавина, С.В. Коренюк

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: fedorenko@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 11 июля 2000 г.

Приведены результаты экспериментального исследования процессов токопереноса в тонких пленках оксидов редкоземельных элементов Lu_2O_3 и Tb_2O_3 на кремнии. Показано, что в зависимости от условий эксперимента преобладает либо термополевая эмиссия, либо надбарьерная эмиссия. При освещении структур величина эффективного поверхностного барьера не изменялась. Представленные результаты являются важными с точки зрения практических приложений тонкопленочных систем на основе оксидов редкоземельных элементов.

Эффекты, связанные с токопереносом в тонких пленках, изучаются давно и в различных целях. В частности, в последние годы возник значительный интерес к изучению механизмов переноса, накопления и захвата заряда в пленках оксидов редкоземельных элементов (ОРЗЭ) [1–3]. Использование ОРЗЭ в качестве диэлектрика МДП-структуры позволяет получить ряд достоинств по сравнению с двуокисью кремния. Это низкие температуры получения ($450\text{--}500^\circ\text{C}$), возможность создания качественных диэлектрических покрытий различными методами, высокие значения диэлектрической проницаемости, радиационная стойкость [4–6]. Однако данные об исследовании поперечной проводимости таких структур со слоями ОРЗЭ толщиной 100 \AA ограничены.

В данной работе показаны результаты экспериментального исследования особенностей токопереноса в структурах оксид редкоземельного элемента–кремний.

Создание оксидных пленок тербия, лутеция, гадолиния толщиной 100 \AA на кремниевой подложке осуществлялось термическим напылением пленок металлов в вакууме с последующим окислением на воздухе при температуре 450°C в течение 15 min. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись при положительном смещении на полевом электроде, соответствующем состоянию обогащения поверх-

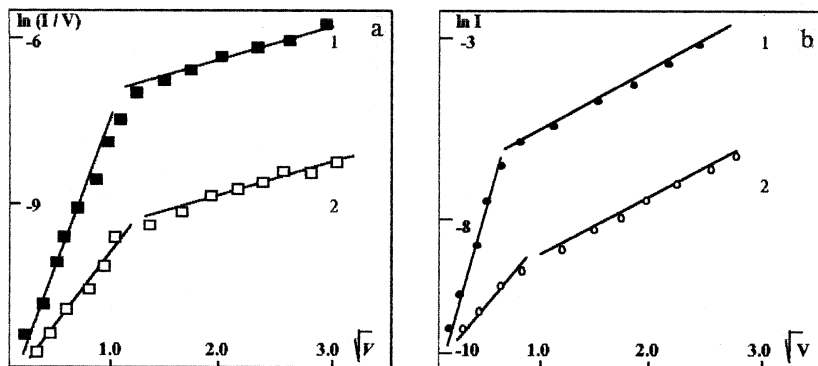


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики МДП-структур с оксидом Lu_2O_3 (a) и Tb_2O_3 (b) при различных температурах: 1 — 300 К, 2 — 77 К.

ности полупроводника n -типа, когда зависимость тока от напряжения и температуры определяется преимущественно проводимостью диэлектрика. Качественный вид ВАХ для различных ОРЗЭ практически не отличался. Рассмотрим основные закономерности, наблюдавшиеся при изучении проводимости. На рис. 1 показаны типичные ВАХ образцов Tb_2O_3 , Lu_2O_3 в координатах Пула–Френкеля и Шотки. Результаты измерений приведены для комнатной и азотной температур. На зависимостях имеется излом в интервале напряжений 0.1–1.2 В, что свидетельствует о смене механизма проводимости. При напряжениях, больших 1.0 В, наблюдается строго линейный участок. Участок ВАХ до излома характеризуется более резким ростом тока с напряжением, что, вероятно, обусловлено влиянием тока, ограниченного пространственным зарядом, или освобождением носителей с мелких ловушек вблизи дна зоны проводимости. На ВАХ при 77 К также наблюдается излом в интервале напряжений 1.0–1.2 В, что подтверждает ведущую роль электрического поля в процессе токопереноса. Для выявления вклада данных механизмов проводимости проведено сравнение экспериментальных значений наклона ВАХ в области линейности с теоретическими. Для теоретической оценки наклона кривых необходимы данные по толщине диэлектрика, которая оценивалась из ВЧ ВФХ, а значение ϵ — по литературным данным принималось равным 12–15 для пленок лю-

Величины наклона ВАХ в предположении справедливости закона Пула–Френкеля β_1 и Шотки β_2 ; энергия активации проводимости E_t

Материал диэлектрика	β_1	β_2	E_t, eV
Y_2O_3	1.45	0.71	0.03
Dy_2O_3	1.24	0.96	0.026
Tb_2O_3	1.58	0.99	0.04
Gd_2O_3	1.6	1.1	—
Lu_2O_3	1.7	0.9	0.032

теция [4], для пленок тербия — 30. Значение наклона в предположении справедливости механизма Пула–Френкеля β_1 дает величину 1.8, а в случае механизма Шотки β_2 — 0.96. Экспериментальные данные по наклону ВАХ показаны в таблице.

Данные приведены с учетом усреднения по 8 образцам для каждого материала. Видно, что для большинства диэлектриков значение наклона, определенное в предположении справедливости механизма Шотки, имеет меньший разброс значений от теоретического, чем значения наклона по Пулу–Френкелю.

Температурные зависимости тока для образцов с Tb_2O_3 и Lu_2O_3 , построенные в координатах Пула–Френкеля и Шотки, представлены на рис. 2. Для семейства кривых параметром является напряжение, поданное на структуру. Видно, что в координатах Пула–Френкеля ВАХ линейна в области высоких температур от 300 до 150 К. В интервале напряжений от 0.8 до 4 В на кривых можно выделить два участка: I_1 , I_2 . Ток I_1 обусловлен механизмом Пула–Френкеля и преобладает при высоких электрических полях и сравнительно высоких температурах. Ток I_2 , вероятно, обусловлен туннельной эмиссией электронов с ловушек в зону проводимости и преобладает при низких температурах и высоких электрических полях. При напряжениях от 0.1 до 0.6–0.8 В температурная зависимость линейна во всем диапазоне температур, проводимость пленок слабо зависит от температуры. С ростом напряжения от 0.8 до 2.5 В наклон температурной зависимости в диапазоне температур 300–150 К имеет тенденцию к уменьшению, характерному для выполнения механизма Пула–Френкеля.

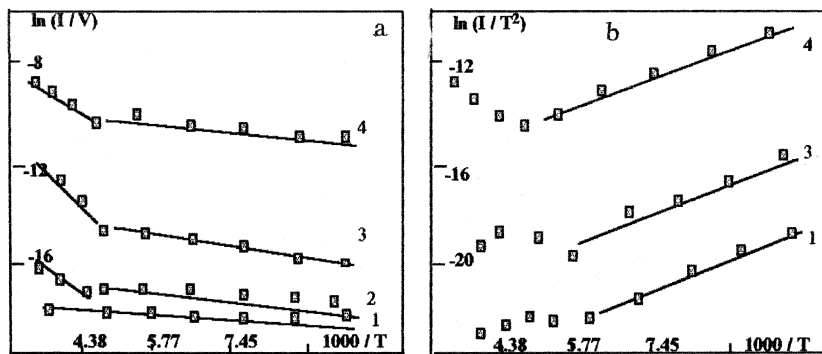


Рис. 2. Температурные зависимости тока МДП-структур с оксидом Lu_2O_3 (a) и Tb_2O_3 (b) при различных напряжениях на полевом электроде: 1 — 0,1, 2 — 0,3, 3 — 1,0, 4 — 2,5 В.

С понижением температуры измерений в широком температурном интервале от 150 до 77 К наблюдалась слабая зависимость тока от температуры в области высоких полей ($U = 1\text{--}4$ В). Как показано на рис. 2, b, в области низких температур температурная зависимость тока для образцов Tb_2O_3 линейна в координатах Шотки, наблюдается некоторый рост тока с уменьшением температуры, что характерно для тока надбарьерной эмиссии и тунелирования.

На основе анализа наклона температурной зависимости в диапазоне температур от 300 до 150 К в координатах $\alpha - \sqrt{v}$ определена энергия активации процесса проводимости $E_t = 0.026\text{--}0.04$ эВ для различных диэлектриков. Данные приведены в таблице. Значения близки к значению энергии ионизации мелких донорных ловушек в пленках ОРЗЭ $E_t = 0.036$ эВ [5], что является еще одним подтверждением выполнения механизма Пула–Френкеля в рассматриваемом интервале температур и полей для тонких пленок лютетия и тербия.

Действие освещения на образцы и полученные ВАХ также подтверждают факт существования нескольких механизмов проводимости пленок. Вольт-амперные характеристики МДП-структур с оксидом Tb_2O_3 , измеренные при освещении, показаны на рис. 3. Видно, что на ВАХ наблюдается излом в области напряжений 1,4–2,5 В и освещенностях до 6000 лк; после излома линейность зависимостей строго соблюдается в координатах Шотки. Постоянство наклона при различных освещенно-

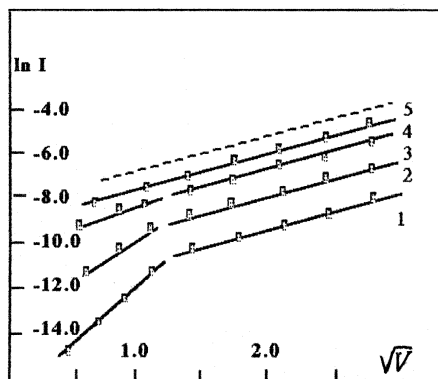


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики МДП-структуры с оксидом Tb_2O_3 при различных освещенностях: 1 — 10^3 , 2 — $3 \cdot 10^3$, 3 — $4 \cdot 10^3$, 4 — $6 \cdot 10^3$, 5 — $7 \cdot 10^3$ lx.

стях и напряжениях свидетельствует о том, что освещение практически не приводит к изменению высоты барьера металл–диэлектрик. Известно [6], что в МДП-структурах эффективность фотопреобразования существенно зависит от величины и знака начального изгиба зон на поверхности, т. е. от барьера для электронов на поверхности полупроводника. В МДП-структурах с пленками оксида тербия из-за отрицательного знака встроенного заряда поверхность n -Si обеднена основными носителями, вследствие чего в области барьера возникающие фотоносители существенно модулируют проводимость обедненного слоя. В области справедливости инжекционного механизма фотогенерация не вызывает значительного увеличения тока из-за высокой концентрации темновых носителей. По мере роста интенсивности освещения точка смены механизма проводимости на графике $\ln I - \sqrt{V}$ (рис. 3) смещается в область больших напряжений. При достижении интенсивностей, превышающих 6000 lx, возможно существование только инжекционного механизма токопереноса. На рис. 3 это обозначено пунктирной линией. С ростом освещенности в МДП-структуре большая часть электронно-дырочных пар, генерированных светом, будет рекомбинировать с объемом полупроводника, и только незначительное их количество даст вклад в фототок.

Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере процессов, происходящих в пленках оксидов тербия и лютеция. Изучение токопереноса в зависимости от напряжения, температуры, освещения показало, что проводимость пленок ОРЗЭ определяется несколькими механизмами, проявление которых зависит от условий эксперимента; так, доминирующим в области полей $E > 10^6$ V/cm и температур от 300 до 150 К является механизм Пула–Френкеля. При более низких температурах становится существенным влияние барьеров металл–диэлектрик и диэлектрик–полупроводник и проводимость диэлектрика определяется туннелированием и надбарьерной эмиссией Шотки.

Список литературы

- [1] *Ling C.H., Bhaskaran J.W., Choi W.K., Ah L.K.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. N 12. P. 6350–6354.
- [2] *Петров А.И., Рожков В.А.* // Физика и химия редкоземельных полупроводников. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1990. 192 с.
- [3] *Choi S.C., Cho M.H., Wangbo S.W., Wang C.N.* // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 71 (7). P. 903–905.
- [4] *Свердлова А.М.* // Электронная техника. 1972. Сер. 2. В. 5. С. 96–100.
- [5] *Андреев Б.А., Соболев Н.А., Курицин Д.И., Маковийчук М.И., Николаев Ю.А., Паршин Е.О.* // ФТП. 1999. В. 4. С. 419–421.
- [6] *Агафонов И.А., Плотников А.Ф., Селезнев В.Н.* // Труды ФИАН. 1987. Т. 184. С. 24–54.