

УДК 539.216.22:537:437.226

©1995

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ПЛЕНОК ОКСИДА ЛЮТЕЦИЯ

*В.А.Рожков, А.И.Петров, В.П.Гончаров*

Самарский государственный университет  
Поступила в Редакцию 20 апреля 1994 г.  
В окончательной редакции 15 июля 1994 г.

Представлены результаты исследования электрического пробоя пленок оксида лютеция в кремниевых МДП-структурах при использовании линейно нарастающего напряжения. Определены гистограммы пробоя и изучены зависимости пробивной напряженности диэлектрических пленок от скорости нарастания пилообразного напряжения на структуре, толщины диэлектрика и температуры. Установлено, что при скоростях роста напряжения  $K_v = 10 \div 10^5$  V/s пробивная напряженность линейно увеличивается с возрастанием  $\ln K_v$ , а при  $K_v \geq 10^5$  V/s наблюдается насыщение величины пробивной напряженности. Показано, что в области малых значений  $K_v$  проявляется более сильная температурная зависимость величины пробивной напряженности. Результаты интерпретируются с точки зрения электронного механизма пробоя, развитие которого при  $K_v < 10^5$  V/s состоит из подготовительной стадии, связанной с накоплением в диэлектрике критического заряда, после чего наступает быстрая фаза собственного пробоя диэлектрика.

Значительный научный интерес к исследованию электрической прочности оксидных пленок редкоземельных элементов (РЗЭ) связан с перспективностью их применения в изделиях электронной техники. Разнообразные электрофизические свойства оксидов РЗЭ, которые характеризуются большими значениями диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 8 \div 20$ ) и удельного сопротивления ( $\rho = 10^{12} \div 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ ), высокой химической и термической стойкостью [1], в сочетании с возможностью формирования диэлектрических пленок при низких температурах на различных полупроводниковых подложках [2,3] позволили создать на их основе тонкопленочные конденсаторы с большой емкостью [4], МДП-варикалы и транзисторы [3,5], электрические переключатели и элементы постоянной репрограммируемой памяти [6]. Надежность этих приборов в основном определяется качеством диэлектрической пленки, электрические поля в которой в рабочем режиме приближаются к пробойным. Однако основные закономерности электрического пробоя пленок оксидов РЗЭ, определяющего предельные характеристики устройств с этими материалами, а также физическая модель пробоя в них остаются невыясненными.

В данной работе приведены результаты исследования электрического пробоя пленочного оксида лютеция, используемого в кремниевых МДП-структурах в качестве диэлектрика, и предлагается механизм этого явления.

## 1. Получение образцов и методика исследования

Исследования проводились на кремниевых МДП-структурах с диэлектрическими пленками из оксида лютетия, изготовленными методом термического распыления редкоземельного металла с последующим его термическим окислением на воздухе. В качестве подложек использовались кремниевые монокристаллические пластины марки КЭФ-5 или КДБ-4.5 ориентации (111) и (100) соответственно, прошедшие химико-динамическую полировку. Перед нанесением пленки РЗЭ подложки обезжиривались кипячением в толуоле, ультразвуковой мойкой в ацетоне и обрабатывались в слабом водном растворе плавиковой кислоты для стравливания собственного оксида.

Нанесение пленки лютетия производилось методом термического распыления РЗЭ в вакууме  $10^{-5}$  mmHg из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. Пленки лютетия окислялись в трубчатом кварцевом реакторе при температуре  $\approx 500^\circ\text{C}$ . Толщина пленок оксида лютетия в исследуемых структурах лежала в пределах  $d = 0.025 \div 0.24 \mu\text{m}$ . Омический контакт к кремниевой поверхности структуры изготавливался методом термического распыления алюминия в вакууме  $10^{-5}$  mmHg. В качестве верхнего контакта к пленке оксида лютетия использовался прижимной электрод из тонкой молибденовой заточенной проволоки с диаметром острия  $0.07 \text{ mm}$ .

Напряженность пробоя  $E_b$  измерялась на линейно нарастающем напряжении при скоростях его роста  $K_v = dV/dt = 10 \div 10^8$ . Пробой регистрировался с помощью запоминающего осциллографа С8-17, за начало пробоя принимался срыв напряжения  $V$  на образце. Время задержки пробоя (промежутки времени от начала приложения к образцу прямоугольного импульса напряжения до момента спада напряжения на образце при пробое) измерялось с помощью осциллографа С8-17 на прямоугольной ступеньке напряжения с амплитудой до  $200 \text{ V}$  и с длительностью переднего фронта равной  $0.15 \mu\text{s}$ . Средние значения и доверительные интервалы напряженности пробоя и времени задержки определялись из 30 измерений для каждого значения  $K_v$ , температуры или амплитуды импульса напряжения. Точки на рисунках соответствуют средним значениям  $E_b$  или  $\tau$ . Знак потенциала на прижимном к оксидной пленке  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  электроде соответствовал режиму обогащения поверхности полупроводника основными носителями заряда.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости напряженности пробоя  $E_b$  пленок  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  различной толщины от логарифма скорости роста пилообразного импульса напряжения на образце. На всех графиках можно выделить две области. Первая область в диапазоне  $K_v = 10 \div 10^5 \text{ V/s}$  характеризуется линейным увеличением  $E_b$  с ростом  $\ln K_v$ . Вторая область соответствует  $K_v > 10^5 \text{ V/s}$ , где  $E_b$  практически не зависит от скорости нарастания пилообразного напряжения. Характерным для этих зависимостей является увеличение электрической прочности пленок с уменьшением их толщины. Отличительная особенность характеристик пробоя диэлектрических пленок в структурах с подложками разного типа проводимости состоит в более сильной зависимости электрической прочности от  $K_v$  и в меньших значениях  $E_b$  в первой

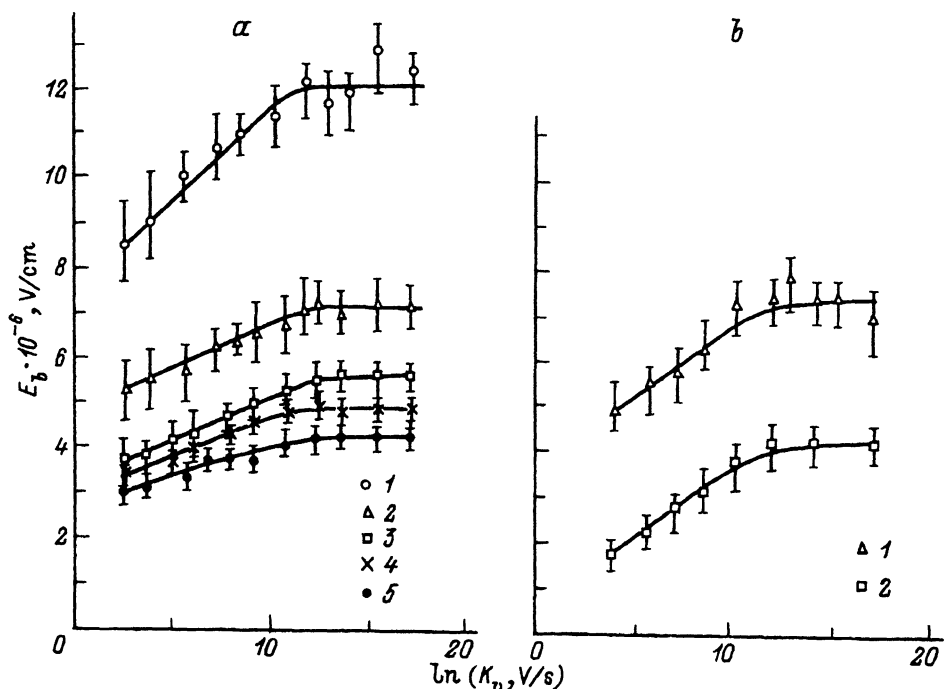


Рис. 1. Зависимости пробивной напряженности пленок  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  разной толщины от скорости роста напряжения.

*a* — структура  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*p*-Si: толщина  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  ( $\mu\text{m}$ ): 1 — 0.025, 2 — 0.065, 3 — 0.12, 4 — 0.18, 5 — 0.24;

*b* — структура  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*n*-Si: толщина  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  ( $\mu\text{m}$ ): 1 — 0.065, 2 — 0.24.

области ( $K_v < 10^5$  V/s) для образцов с кремнием *n*-типа проводимости по сравнению с *p*-кремнием. Для второго участка характеристики ( $K_v > 10^5$  V/s) величины пробивной напряженности для структур на основе кремния разного типа проводимости в пределах статистического разброса практически совпадают между собой. Поскольку образцы с *n*- и *p*-кремнием изготавливались одновременно и свойства пленок хорошо воспроизводились, то, вероятнее всего, такая особенность не связана с технологией или внутренними свойствами структуры, а вызвана различным влиянием внешних условий, так как измерения на этих образцах проводились при разных полярностях напряжения.

На рис. 2 приведены гистограммы по напряженности пробоя пленок  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ , которые характеризуют статистическую картину исследуемого явления, для структур на основе *n*- и *p*-кремния и различных величин  $K_v$ . Для структуры  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*n*-Si при значении  $K_v = 35$  V/s (рис. 2, *a*) наблюдается почти симметричный вид функции распределения, а при больших величинах  $K_v = 8.5 \cdot 10^6$  V/s (рис. 2, *b*) характерно асимметричное распределение с относительно медленным возрастанием функции до ее максимального значения и резким спадом характеристики для больших значений пробивного поля. Для структуры с подложкой из *p*-Si гистограммы для малых и больших значений  $K_v$  (рис. 2, *c*, *d*) качественно похожи. Однако и в этом случае для  $K_v = 8.5 \cdot 10^6$  V/s (рис. 2, *d*) проявляется большая асимметрия характеристики, чем в случае измерений при малой скорости роста напряжения  $K_v = 35$  V/s (рис. 2, *c*).

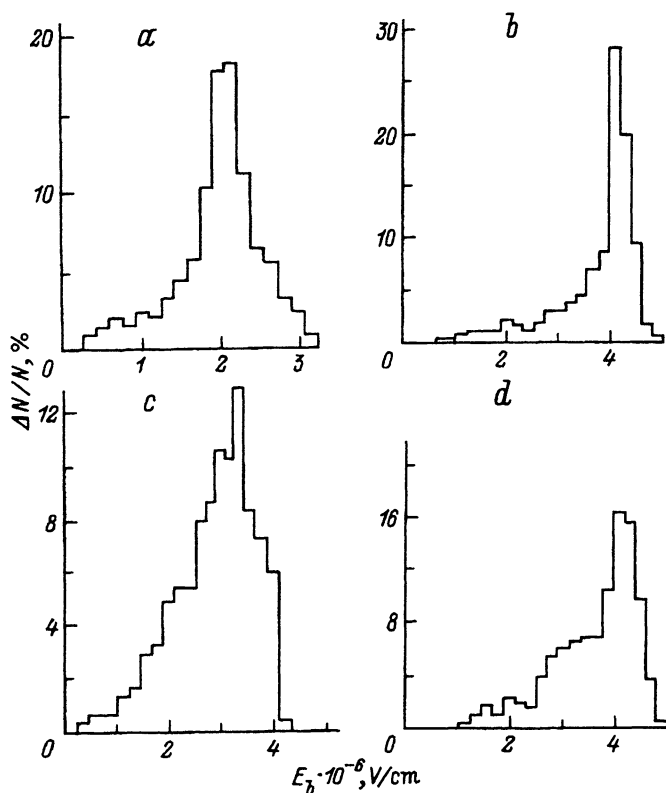


Рис. 2. Гистограммы пробивной напряженности пленок  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  при различных скоростях роста напряжения ( $d = 0.24 \mu\text{m}$ ).

*a* — структура  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*n*-Si,  $K_v = 35 \text{ V/s}$ ; *b* — структура  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*n*-Si,  $K_v = 8.5 \cdot 10^6 \text{ V/s}$ ; *c* — структура  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*p*-Si,  $K_v = 35 \text{ V/s}$ ; *d* — структура  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ -*p*-Si,  $K_v = 8.5 \cdot 10^6 \text{ V/s}$ .

На рис. 3 приведены температурные зависимости пробивной напряженности пленки  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  при различных значениях  $K_v$ . Как видно, величина  $E_b$  линейно уменьшается с ростом температуры, причем более сильная температурная зависимость пробивной напряженности соответствует меньшим скоростям роста напряжения на структуре. Характерно, что температурные графики при большом значении  $K_v = 5.75 \cdot 10^6 \text{ V/s}$  для пленок на кремниевых подложках *n*- и *p*-типа в пределах статистического разброса практически идентичны, а для малой величины  $K_v = 35 \text{ V/s}$  значения пробивного поля пленки  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  на подложке *n*-Si меньше, чем на *p*-Si.

Наличие двух областей в зависимости электрической прочности пленки  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  от  $\ln K_v$  (рис. 1), характеризующихся разными гистограммами и температурными зависимостями пробивной напряженности, свидетельствует о двух разных механизмах пробоя при различных значениях  $K_v$ . Для первого участка, при  $K_v = 10 \div 10^5 \text{ V/s}$ , до начала собственного пробоя характерно время ожидания, уменьшающееся с величиной прикладываемого напряжения. Величина этого времени больше времени собственного пробоя. Второй участок, с  $K_v > 10^5 \text{ V/s}$ , где пробивная напряженность не зависит от  $K_v$ , а время ожидания срав-

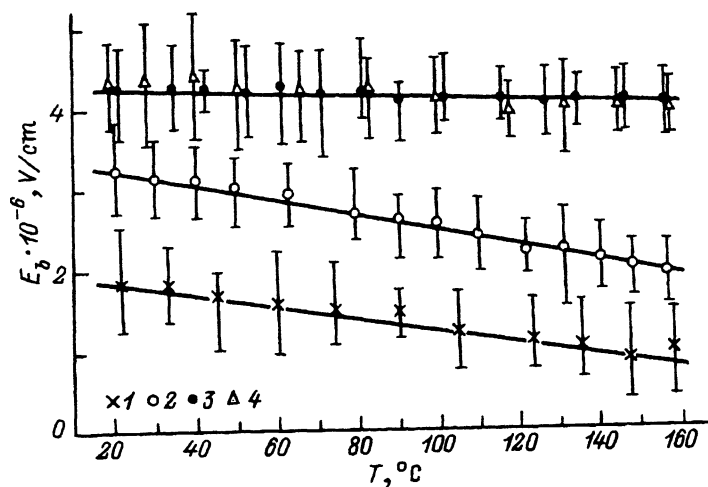


Рис. 3. Температурные зависимости пробивной напряженности пленок  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  при различных  $K_v$  ( $d = 0.24 \mu\text{m}$ ).

$K_v$  (V/s): 1 — 35 ( $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-n-Si}$ ), 2 — 35 ( $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-p-Si}$ ), 3 —  $5.75 \cdot 10^6$  ( $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-n-Si}$ ), 4 —  $5.75 \cdot 10^6$  ( $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-p-Si}$ ).

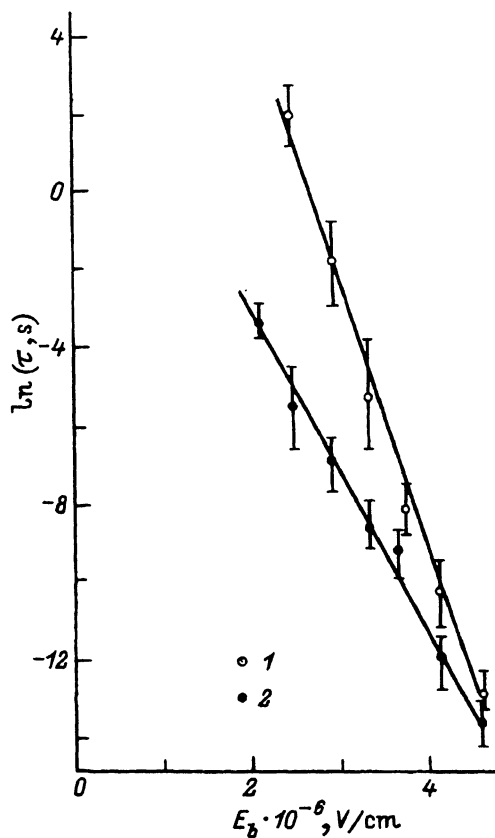


Рис. 4. Зависимости времени задержки пробоя от величины электрического поля структуры  $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-p-Si}$  (1) и  $\text{Lu}_2\text{O}_3\text{-n-Si}$  (2);  $d = 0.24 \mu\text{m}$ .

нимо с временем собственного пробоя или меньше его, соответствует собственному пробояю. Последнее предположение подтверждается исследованием времени задержки пробоя  $\tau$  от величины напряженности электрического поля в диэлектрической пленке при воздействии прямоугольной ступеньки напряжения (рис. 4). Время задержки пробоя экспоненциально уменьшалось более чем в  $10^4$  и  $10^6$  раз с возрастанием величины электрического поля для образцов с  $n$ - и  $p$ -кремнием соответственно. Время задержки пробоя при одинаковых электрических полях на образцах с подложкой  $p$ -Si больше, чем с подложкой  $n$ -Si, причем это отличие сильнее проявляется при меньших значениях напряженности электрического поля. При электрическом поле  $E = 4.5 \cdot 10^6$  V/cm пробой пленки  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  на подложках разного типа проводимости характеризовался практически одинаковым значением  $\tau$ , примерно равным  $1 \mu\text{s}$ .

Как показали исследования, кинетические зависимости тока после приложения к МДП-структуре напряжения описываются зависимостью  $J \approx t^{-n}$ , где  $n = 0.23 \div 0.72$ . Такое поведение тока типично для МДМ-систем с пленками оксидов РЗЭ [7] и объясняется с помощью модели эстафетного переноса носителей заряда [8], согласно которой напряжение, приложенное к диэлектрику, со временем перераспределяется между объемом и контактной областью при накоплении в ней заряда, экранирующего поле в диэлектрике. Вольт-амперные характеристики исследованных структур в сильных электрических полях описываются близкими между собой механизмами Пула и Пула-Френкеля.

Наблюдаемая совокупность характеристик пробоя не описывается тепловой моделью или механизмом ударной ионизации. Тепловая модель пробоя [9] предсказывает уменьшение  $E_b$  с ростом температуры и линейное увеличение  $E_b$  с ростом  $\ln K_v$ . Однако для теплового пробоя электрическое поле пробоя не должно зависеть от  $K_v$  при малых скоростях роста напряжения. Оценки показывают, что насыщение величины  $E_b$  должно проявляться при  $K_v < 10^5$  V/s. Однако экспериментальные характеристики не имеют тенденции к насыщению вплоть до скоростей  $K_v = 10$  V/s. Поэтому тепловой механизм пробоя не реализуется для исследуемых пленок.

Для модели ударной ионизации [10] характерно увеличение пробивной напряженности с ростом температуры, что не проявляется на эксперименте. Термофлуктуационный механизм [11] также не описывает пробоя исследуемых пленок, поскольку характерное время  $\tau_0$ , равное обратной частоте электрон-фононных взаимодействий и составляющее  $10^{-13}$  s, оказывается на 2–5 порядков меньше значений, определенных из экспериментальных температурных зависимостей времени задержки пробоя.

Наблюдаемые экспериментально закономерности можно объяснить в рамках модели, предложенной в [12], согласно которой развитие пробоя исследуемых пленок состоит из начальной стадии, связанной с накоплением в диэлектрике критического заряда  $Q_c$ , при превышении которого диэлектрик переходит в быструю фазу собственного пробоя в условиях сильного поля [13]. В этой модели предполагается, что накапливаемый в диэлектрике заряд пропорционален заряду, прошедшему через структуру, кинетика тока подчиняется гиперболическому закону, а плотность тока описывается модифицированным выражением,

применимым и при малых полях,

$$j = j_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{\alpha E}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $j_0$  — плотность тока, слабо зависящая от поля и температуры,  $E_a$  — энергия активации проводимости,  $E$  — напряженность электрического поля,  $\alpha$  — постоянная, определяющая влияние поля  $E$  на скорость роста тока.

При этих условиях, которые подтверждаются экспериментально, соотношения для времени задержки пробоя и величины пробивной напряженности на прямоугольном и пилообразном импульсах напряжения соответственно имеют вид

$$\tau = \frac{\exp(AQ_c) - 1}{Aj_0} \exp\left(\frac{E_a - \alpha E}{kT}\right), \quad (2)$$

$$E_b = \frac{Q_c}{dC_k} + \frac{E_a}{\alpha} - \frac{kT}{\alpha} \ln\left(\frac{j_0}{K_E d C_k}\right), \quad (3)$$

где  $A = \alpha/(kTC_k d)$ ,  $C_k$  — удельная емкость контактной области,  $K_E = \frac{dE}{dt}$  — скорость роста напряженности электрического поля в диэлектрике,  $d$  — толщина диэлектрика.

Согласно (3), пробивная напряженность уменьшается с ростом температуры, так как оценки показывают, что  $j_0 > K_E d C_k$ . Причем наклон температурной зависимости определяется значением  $\frac{k}{\alpha} \ln\left(\frac{j_0}{K_E d C_k}\right)$  и возрастает с уменьшением скорости роста пилообразного напряжения, что проявляется экспериментально. Соотношение (3) можно представить в виде

$$E_0 = \frac{kT}{\alpha} \ln(K_v) + \frac{kT}{\alpha} \ln\left(\frac{C_k}{j_0}\right) + \frac{Q_c}{dC_k} + \frac{E_a}{\alpha}, \quad (4)$$

где  $K_v = K_E d$ . Из (4) видно, что пробивная напряженность прямо пропорциональна  $\ln K_v$ .

Из (2) следует, что время задержки пробоя экспоненциально убывает с ростом напряженности электрического поля. Эти предсказываемые из теоретических соотношений следствия, как показано ранее, действительно экспериментально подтверждаются. Формула (3) описывает поведение электрической прочности на первом участке экспериментальной характеристики (рис. 1), когда критический заряд успевает сформироваться в диэлектрике и не описывает область, для которой  $K_v > 10^6$  V/s, а электрическая прочность соответствует пробивной напряженности диэлектрического материала.

Меньшие величины пробивной напряженности пленок в структурах с подложкой  $n$ -кремния, которые исследовались при положительной полярности приложенного напряжения, обусловлены влиянием влажности окружающей среды. При положительном потенциале прижимного электрода происходит инжекция ионов водорода из адсорбированных на поверхности диэлектрика молекул воды, которые при относительной влажности больше 50% могут образовывать сплошную полимолекулярную пленку [14]. Ионы водорода, инжектированные в диэлектрик, приводят к увеличению его проводимости и к уменьшению

пробивной напряженности. При больших значениях  $K_v$  ионы водорода не успевают переместиться под действием поля и влажность не влияет на электрическую прочность пленки.

Аналогичное явление наблюдалось также в структурах с пленками оксида гадолиния [12], электрическая прочность которых при положительной полярности напряжения и  $K_v < 10^5$  V/s на воздухе была меньше, чем в вакууме. Различия в величине заряда и скорости его накопления в разных местах диэлектрика приводят к разбросу значений пробивной напряженности, который характеризуется гистограммами пробоя.

Таким образом, подготовительная стадия пробоя в пленке оксида лютетия определяется накоплением в диэлектрике заряда, приводящего к увеличению напряженности электрического поля.

### Список литературы

- [1] Вдовин О.С., Кирьяшкина З.И., Котелков В.Н. и др. Пленки оксидов редкоземельных элементов в МДМ- и МДП-структурах. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 159 с.
- [2] Рожков В.А., Вдовин О.С., Свердлов А.М. и др. // Микроэлектроника. 1976. Т. 5. № 1. С. 28–31.
- [3] Рожков В.А., Вдовин О.С., Котелков В.Н. и др. // Микроэлектроника. 1973. Т. 2. № 3. С. 267–270.
- [4] Крикоров В.С., Красов В.Г., Маркарянц А.Е. // Электронная техника. Сер. 12. 1971. Вып. 1(12). С. 79–82.
- [5] Sing P., Baishya B. // Thin Solid Films. 1987. V. 147. N 1. P. 25–32.
- [6] Рожков В.А., Петров А.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 1. С. 49–52.
- [7] Ильин А.Г. Канд. дис. Иркутск: Пед. ин-т, 1976. 161 с.
- [8] Тиман Б.Л. // ФТП. 1973. Т. 7. № 2. С. 225–229.
- [9] Owen A.E., Robertson J.M., Main C. // J. Non-Cryst. Solids. 1979. V. 32. N 1. P. 29–52.
- [10] Klein N. // Thin Solid Films. 1978. V. 50. N 3. P. 223–232.
- [11] Жуков С.В., Закревский В.А., Кабин С.П., Сударь Н.Т. // Изв. вузов. Физика. 1988. № 4 (316). С. 86–90.
- [12] Петров А.И., Рожков В.А. // РЭ. 1993. Т. 38. № 2. С. 296–301.
- [13] Nagai E. // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. N 4. P. 2478–2489.
- [14] Силаев Е.А., Голованова Г.Ф. // Поверхность. 1982. № 2. С. 109–114.