

11;12

Влияние магнитного поля на скорость травления диоксида кремния в $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ плазме

© Ю.П. СНИТОВСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013 Минск, Белоруссия
e-mail: kanc@gw.bsuir.unibel.by

(Поступило в Редакцию 2 июня 2008 г.)

Обнаружен эффект сильного влияния приэлектродного неоднородного магнитного поля, скрещенного с электрическим полем, на скорость травления диоксида кремния на подложках из стекла в $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ плазме, когда ларморовская частота ($\approx 10^9 \text{ s}^{-1}$) намного больше частоты столкновений электрона с окружающими его частицами плазмы ($\approx 10^6 \text{ s}^{-1}$) и частоты приложенного электрического ВЧ-поля ($\approx 10^7 \text{ s}^{-1}$).

Удержание электронов магнитным полем в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности подложки повышает скорость генерации химически активных частиц, что приводит к увеличению скорости травления диоксида кремния.

PACS: 52.77.Bn, 52.40.Hf

Введение

Повышение быстродействия изделий микроэлектроники, а также увеличение степени их интеграции и уменьшение размеров элементов и компонентов вызвали необходимость перехода в технологии изготовления от процессов жидкостного травления к процессам плазменного высокочастотного (ВЧ) и других видов травления в различных газах и их смесях [1–10].

Увеличение скорости и анизотропии травления путем повышения давления при одновременном увеличении подаваемой ВЧ-мощности приводит к ряду нежелательных эффектов: пробоем изоляции переходов в микросхемах, радиационному воздействию на обрабатываемые структуры и др. Поэтому возникает необходимость в проведении процессов с применением низкотемпературной плазмы [1–5,7–10].

Согласно классификации магнитных полей, способных воздействовать на те или иные процессы [11], рассматриваемые в настоящей работе поля относятся к числу слабых, $\mu H \ll kT$, в которых проявляется ряд эффектов, обусловленных структурой тонких пленок [12–14]. В работе [7] была выдвинута концепция, согласно которой повышение скорости травления материалов может быть достигнуто за счет использования плотной плазмы и низкого давления газа примерно 10^{-3} mm Hg ($\sim 0.133 \text{ Pa}$). Использование таких низких давлений газа является существенным для увеличения длины свободного пробега молекул газа и для удаления продуктов реакции с поверхности обрабатываемой пластины. Отмечено, что эффект увеличения скорости травления может быть достигнут введением магнитного поля постоянного тока параллельно двум электродам, электроду возбуждения плазмы и электроду-подложкодержателю. Однако данных по скорости травления диоксида кремния не приводится.

Целью настоящей работы является исследование влияния воздействия приэлектродного магнитного поля на скорость локального травления диоксида кремния на подложках из стекла, кремния и оксидов индий–олово в $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ плазме ВЧ-разряда.

Образцы и методика эксперимента

В эксперименте использовали установку, представляющую собой ВЧ диодную систему с планарным расположением электродов для получения пленок оксидов индий–олово [14,15], содержащую входную и рабочие камеры, отделенные друг от друга и от атмосферы, и снабженную транспортирующим устройством, перемещающим подложки вдоль установки. Типовые параметры травления: частота генератора — 13.56 МГц, мощность 0.5 kW, приложенное напряжение на электродах — 300 V, содержание кислорода в смеси $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ — 30%, давление рабочей смеси 0.1–1 Pa. Пленки диоксида кремния толщиной 0.17–0.2 μm наносили разложением моносилана в потоке кислорода на стеклянные пластины размером $101 \times 101 \times 0.5 \text{ mm}$ при температуре 370°C . Во всех экспериментах использовали стекло марки „VERTEC“ (Швейцария) следующего состава: SiO_2 — 72, Na_2O — 14, K_2O — 0.6, CaO — 7.1, MgO — 4, Al_2O_3 — 1.9, Fe_2O_3 — 0.1, SO_3 — 0.3 mass.%.

Стеклянные пластины со слоем диоксида кремния размещали на электроде-подложкодержателе диаметром 230 mm. Остаточное давление во входной камере поддерживали 4 kPa, а в рабочей камере — $6.5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$. При введении через натекатели смеси газов кислород–фреон в соотношении 2:5 давление повышалось до 0.1–0.6 Pa. Как и в [7], использование такого низкого давления смеси газов является существенным для увеличения длины свободного пробега молекул газа и для удаления продуктов реакции с поверхности

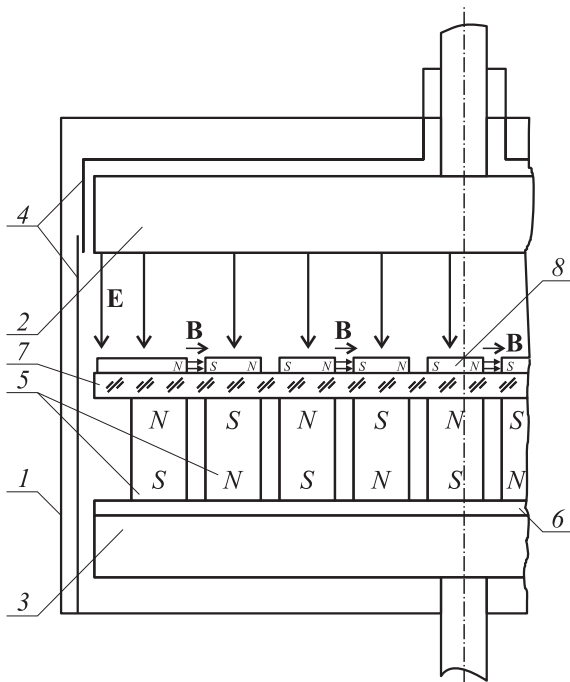


Рис. 1. Схема устройства для сухого травления диоксида кремния в плазме ($\text{CF}_4 + \text{O}_2$) с наложением магнитного поля и использованием полюсных наконечников: 1 — реактор, 2 — электрод возбуждения плазмы, 3 — электрод-подложкодержатель пластины, 4 — экраны, 5 — постоянные магниты, 6 — ядро, 7 — обрабатываемая стеклянная пластина со слоем диоксида кремния, 8 — полюсные наконечники.

пластины. При подаче на электроды ВЧ-мощности при напряжении 0.3–0.4 кВ плазма ВЧ-разряда зажигалась и локализовалась в области между электродами таким образом, что вектор электрического поля был направлен перпендикулярно поверхности электрода возбуждения плазмы и поверхности электрода-подложкодержателя с расположенными на нем пластинами. Поле E настолько быстро изменяет свое направление, что заряды не успевают выйти на электроды или на стенки разрядной камеры. Это не только не ухудшает условий существования разряда, но, наоборот, способствует ему.

Время травления диоксида кремния изменяли в пределах от 5 до 60 с. Были исследованы варианты локального травления диоксида кремния через свободные маски, а также способы с одновременным использованием магнитного поля и масок, выполняющих в этом случае роль полюсных наконечников.

Для локального наложения магнитного поля использовали переменную-полюсную систему, расположенную на электроде-подложкодержателе в плоскости, перпендикулярной направлению электрического поля. В эксперименте использовали магнитную систему с магнитами по техническим условиям ПЯО. 404. 565 ТУ (магнит пластинчатый из феррита марки М18БА220-6), имеющую следующие характеристики: остаточная индукция — не менее 0.33 Т, произведение магнитной индукции и

намагниченности $BH = 18 \text{ kJ/m}^3$, коэрцитивная сила по намагниченности H_{cm} не менее 220 кА/м, интервал рабочих температур $-5 - +100^\circ\text{C}$. Области расположения на пластинах диоксида кремния совмещали с межполюсными промежутками магнитной системы. Полюсные коваровые или биметаллические наконечники толщиной 0.1–0.5 мм размещали поверх стеклянных пластин и совмещали с границами областей, подлежащих травлению (рис. 1). Применение полюсных наконечников позволяет сконцентрировать магнитное поле в области стравливаемого слоя, т.е. локализовать и повысить эффективность ионизации рабочего газа.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что скорость травления диоксида кремния без использования магнитной системы при мощности разряда 0.5 кВт составляет 6–8 мм/с.

Исследование процесса локального травления диоксида кремния при наложении магнитного поля без использования полюсных наконечников показало, что скорость травления зависит от индукции магнитного поля B и давления смеси газов $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ (рис. 2).

При давлении смеси газов ($\text{CF}_4 + \text{O}_2$) $P \approx 0.1 \text{ Pa}$ скорость травления диоксида кремния почти не зависит от значения B в диапазоне от 0.01 до 0.08 Т и не превышает 6.6 нм/с. При давлении смеси газов 0.2, 0.5 и 0.6 Па максимум скорости травления наблюдался в диапазоне значений от 0.04 до 0.07 Т, составляя соответственно 25, 51 и 40 нм/с. Экстремальный характер зависимостей скорости травления диоксида кремния от величины магнитной индукции (рис. 2, а) и давления смеси газов $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ (рис. 2, б) облегчает выбор оптимальных режимов травления, обеспечивающих локальное удаление диоксида кремния на поверхности обрабатываемой пластины.

Скорость травления диоксида кремния на участках, расположенных над межполюсными промежутками магнитной системы на расстоянии 0.6 мм от ее поверхности, превышает в 9–10 раз скорость травления диоксида кремния на остальных участках подложки. Известно (см., например, [16]), что если ларморовская частота намного больше частоты столкновений электрона с окружающими его частицами плазмы и частоты приложенного электрического ВЧ-поля, то в этом случае электрон захватывается магнитным полем и движется по спирали вокруг магнитной силовой линии. В наших опытах ларморовская частота примерно равна 10^9 s^{-1} , частота столкновений электрона с окружающими его частицами составила примерно 10^6 s^{-1} , а частота внешнего электрического ВЧ-поля порядка 10^7 s^{-1} , что обеспечивает захват электронов магнитным полем и их удержание в области магнитного поля в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности образца.

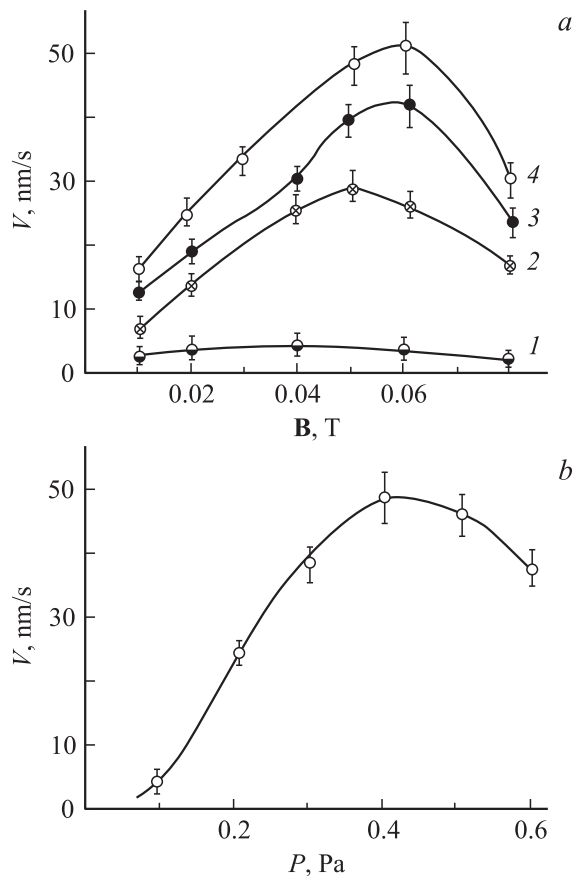


Рис. 2. Зависимость скорости локального травления диоксида кремния от магнитной индукции B (а) при давлении 0.1 (1); 0.2 (2); 0.6 (3); 0.5 Па (4) и от давления рабочей смеси (б) при $B = 0.05$ Т.

Поэтому столь существенное повышение в наших опытах скорости локального травления диоксида кремния обусловлено тем, что, во-первых, удержание электронов магнитным полем повышает скорость генерации химически активных частиц в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности образца, а во-вторых, — связано с использованием в газовой смеси кислорода.

Роль кислорода в процессе плазмохимического травления кремния, ниобия, диоксида кремния изучалась в ряде работ и детально обсуждалась, например, в [5]. Кислород, реагируя с частицами, содержащими фтор, способствует освобождению атомарного фтора, замедляет скорость гетерогенных и гомогенных реакций рекомбинации атомов фтора другими частицами за счет окисления радикалов CF_4 и углеродсодержащих полимеров, образуя инертные продукты типа CO , CO_2 .

Установленные в работе значения скорости травления диоксида кремния в 2.5 раза превышает известные [17] результаты работы, полученные при травлении в CHF_3 плазме, а также в 11.5 и 30.7 раза превышают данные работы [6], полученные при травлении в плазме $CF_4 + O_2$ газового разряда высоковольтного типа для ионно-химического и плазмохимического травления. Это мож-

но объяснить сильной локализацией травления диоксида кремния только в областях скрещивания электрического и магнитного полей.

При использовании магнитной системы происходит локальное вытравливание канавок в диоксиде кремния, ширина которых зависит от времени травления и изменяется в пределах от 2 до 5 μm . Полное удаление диоксида в канавке до границы с подложкой происходит в течение 15–20 с, так как скорость локального травления значительно возросла (до 25 nm/s).

Следует отметить, что генерации дефектов при травлении, как показали исследования пористости и плотности пленок, не происходит. Такое травление способствует очистке поверхности диоксида кремния и улучшает адгезию к нему других слоев.

Использование полюсных наконечников (см. рис. 1) позволяет снизить ширину вытравливаемой в диоксиде кремния канавки до 0.1 μm . При ширине рабочего промежутка между полюсными наконечниками, равной 0.5 μm , скорость травления диоксида кремния составляла 50 nm/s. При этом остальная часть стеклянной пластины не подвергалась воздействию плазмы.

Установленные в работе значения скорости локального травления диоксида кремния при наложении магнитного поля можно объяснить следующим образом. Систематическая передача энергии электронам электрическим полем при подаче ВЧ-мощности и установлении требуемых давлений рабочего газа приводит к тому, что в области скрещенных магнитного и электрических полей образуются магнитные ловушки для электронов, в которых они движутся до тех пор, пока вследствие нескольких ионизирующих столкновений не потеряют полученную от поля энергию. Иными словами магнитное поле увеличивает траекторию движения электронов в межполюсном промежутке, следовательно, возрастает и число столкновений с атомами и молекулами рабочего газа. Таким образом, большая часть энергии электрона, захваченного ловушкой, используется на ионизацию нейтральных молекул или атомов, что и приводит к возрастанию концентрации активных частиц плазмы (ионов и радикалов) в межполюсном промежутке. В результате в местах образования зоны плотной плазмы происходит ее интенсивное взаимодействие с обрабатываемой пластиной, что приводит к увеличению скорости локального травления.

Этот эффект может быть использован для разработки устройства, в котором магниты магнитоплана, перемещающего подложки, используются для достижения эффекта магнетронного травления.

Следует отметить, что при травлении слой диоксида кремния толщиной 0.2 μm стравливается с участков, расположенных над межполюсными промежутками, за 20–25 с, в то время как слой диоксида кремния на остальной площади подложки уменьшается за это же время лишь на 0.02–0.025 μm .

Применение в качестве полюсных наконечников биметаллических свободных масок, нижний (прилегающий к

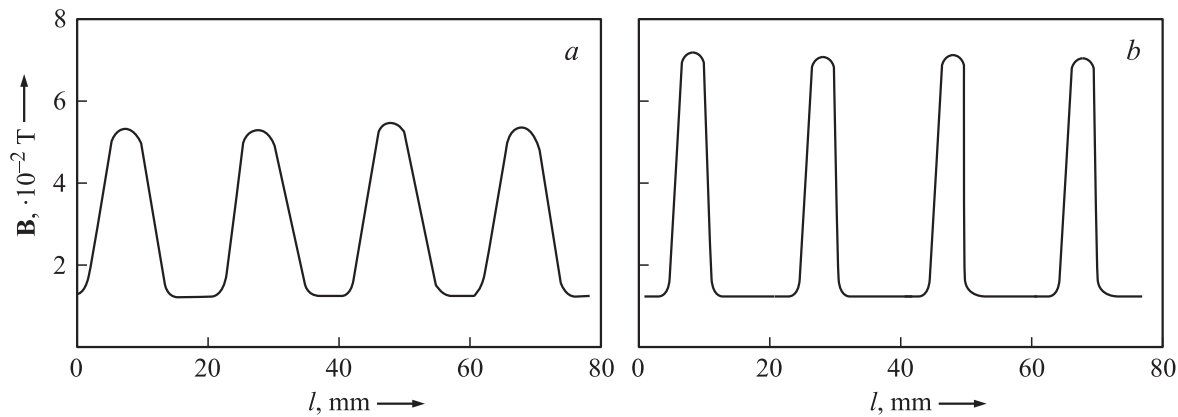


Рис. 3. Магнитограмма магнитной системы с периодически изменяющейся вдоль пластины величиной магнитной индукции B при локальном травлении пленки диоксида кремния: a — без полюсных наконечников; b — с полюсными наконечниками.

подложке) слой которых выполнен из магнитомягкого материала, например кобальта, а верхний — из проводящего материала, позволит разработать устройства, в которых травление и нанесение материалов выполняется в едином технологическом цикле при использовании различных газов или их смесей.

Переход от магнитной системы при травлении диоксида кремния без использования полюсных наконечников к магнитной системе с использованием полюсных наконечников показан на рис. 3, из которого видно, что концентрация магнитного поля в районе щели сопровождается увеличением его магнитной индукции, и протяженность его вдоль подложки уменьшается.

Вектор магнитной индукции B совместно с вектором E образует скрещенное поле, обладающее вследствие изменения величины и знака в различных точках разрядного промежутка свойствами магнитной линзы и магнитной ловушки.

Электроны фокусируются такой линзой, собираясь преимущественно в зоне, приближенной к поверхности подложки в межполюсном промежутке. Попавшие в магнитную ловушку электроны, двигаясь в межполюсном промежутке по сложным траекториям, ионизируют рабочий газ, многократно повышая степень его ионизации [18].

При наложении магнитного поля (и использовании полюсных наконечников) на ВЧ-разряд сфокусированные магнитной линзой электроны, попадая в щели в однородное магнитное поле, начинают двигаться в нем по спирали, ось которой направлена вдоль силовых линий магнитного поля. При этом они вынуждены проходить большее расстояние, нежели в отсутствие полюсных наконечников, что увеличивает число их соударений с молекулами газа не единицу пути, это еще больше повышает степень ионизации рабочего газа [19].

Таким образом, наличие полюсных наконечников позволяет сконцентрировать магнитное поле в районе щели (в области травливаемого диоксида кремния на подложке), повысить его магнитную индукцию, т.е. лока-

лизовать и повысить эффективность ионизации рабочего газа. Удержание электронов магнитным полем в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности подложки повышает скорость генерации химически активных частиц, при этом увеличивается плотность потоков ионов и радикалов на поверхность обрабатываемой пластины в районе щели, что приводит к увеличению скорости травления диоксида кремния.

Следует отметить, что существенных различий в травлении пленок диоксида кремния с подложек из стекла и кремния выявлено не было.

Методом рентгеновской рефлектометрии [20] было установлено, что пленка диоксида кремния, нанесенная на слой оксидов индий—олово по методике [15], травливается не полностью. Эффективная толщина остаточного слоя диоксида кремния связана с величиной зерна пленки оксидов индий—олово. При травлении диоксида кремния без приложения магнитного поля эффективная толщина остаточного слоя диоксида кремния на пленке оксидов индий—олово с величиной зерна 30–40 нм составляла 1–2 нм, а при величине зерна 100–200 нм — 6–12 нм причем в последнем случае она почти не изменялась при проведении повторных циклов травления. Кроме того, интенсивная бомбардировка поверхности полупроводниковых оксидов индий—олово ионами фтора и кислорода изменяет их стехиометрический состав, что уменьшает поверхностное сопротивление пленки в 1.5–2 раза. С приложением магнитного поля эффективная величина диоксида кремния на пленках из оксидов индий—олово при травлении была в два раза меньше. Полученные результаты свидетельствуют о том, что оставшийся диоксид кремния, по-видимому, является не сплошной пленкой, а представляет собой отдельные островки, заполняющие неровности микрорельефа пленки оксидов индий—олово.

Резюмируя вышеизложенное и учитывая, что большинство плазменных процессов осаждения или удаления материалов определяются взаимодействием плазмы с поверхностью твердого тела, следует считать перспек-

тивным совершенствование как технологических процессов, так и плазменного оборудования с использованием скрещенных электрического и магнитного полей, что облегчит интеграцию процесса сухого травления материалов с другими процессами в кластерных системах.

Выводы

Таким образом, в данной работе показана эффективность технологического процесса травления диоксида кремния в плазме $CF_4 + O_2$ в скрещенных электрическом и магнитном полях. При этом установлено, что в диапазонах значений составляющей магнитной индукции от 0.04 до 0.07 Т и давлений смеси газов $CF_4 + O_2$ от 0.3 до 0.5 Ра достигается эффект существенного увеличения скорости травления. Предложен механизм травления, объясняющий экспериментально полученные зависимости.

Травление диоксида кремния в скрещенных электрическом и магнитном полях перспективно для использования в технологии изделий микроэлектроники, оптоэлектроники и других областях техники за счет существенного повышения скорости и локализации областей травления с использованием в качестве полюсных наконечников свободных масок.

Список литературы

- [1] *Ивановский Г.Ф.* Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
- [2] *Данилин Б.С., Киреев В.Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 262 с.
- [3] *Черняев В.Н.* Физико-химические процессы в технологии РЭА. М.: Высш. шк., 1987. 376 с.
- [4] *Орликовский А.А.* // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 6. С. 415–426.
- [5] *Орликовский А.А.* // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. № 5. С. 344–362.
- [6] *Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И.* // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 3. С. 209–224.
- [7] *Ohmi T., Shibata T.* // Microelectronic Engineering. 1991. Vol. 10. N 3–4. P. 177–196.
- [8] *Данилюк А.Л., Снитовский Ю.П.* // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 4. С. 305–311.
- [9] *Снитовский Ю.П., Сенько А.Ф.* // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 5. С. 390–394.
- [10] *Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел. Сб. статей 1986–1987 гг. / Пер. с англ; сост. Е.С. Машкова. М.: Мир, 1989. 349 с.*
- [11] *Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л.* // УФН. 1988. Т. 155. Вып. 1. С. 3–45.
- [12] *Байцар А.С., Яцишин Б.П.* // Тез. докл. IV Всесоюз. симп. Сумы, 1985. С. 16–17.
- [13] *Фролов А.И., Крупкин П.Л., Козейкин Б.В., Ошурина Л.А.* // Тез. докл. IV Всесоюз. симп. Сумы, 1985. С. 17–18.
- [14] *Заико А.Ф., Готлиб С.О., Снитовский Ю.П.* // Весті АН БССР. Сер. Фіз.-тэхніч. навук. 1989. № 2. С. 90–92.

- [15] *Готлиб С.О., Заико А.Ф., Снитовский Ю.П.* // Электрон. техника. Сер. 6. Материалы. 1987. Вып. 1. С. 49–53.
- [16] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [17] *Данилин Б.С., Киреев В.Ю., Врублевский Э.М.* // Электрон. техника. Сер. 6. Материалы. 1983. Вып. 9(182). С. 3–16.
- [18] *Данилин Б.С.* // Электрон. техника. Сер. 6. Материалы. 1983. Вып. 6. С. 65–73.
- [19] *Кельман В.М., Явор С.Я.* Электронная оптика. Л.: Наука, 1968. 488 с.
- [20] *Синайский В.М., Сиденко В.И.* // ПТЭ. 1974. № 6. С. 5–13.