

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2010 В. В. Гуляев, Ю. И. Дикарев, В. М. Рубинштейн, С. М. Цветков, Е. Н. Бормонтов

Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Россия

Поступила в редакцию: 08.04.2010 г.

Аннотация. Изучены кинетика, механизм и особенности высокоскоростного плазмохимического травления монокристаллического LiNbO_3 в газоразрядной фторсодержащей плазме. Установлено, что этот процесс является типичным топохимическим. Методами растровой электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа и рентгеновской дифрактометрии определены: динамика изменения морфологии поверхностного слоя, элементный и фазовый состав твердых продуктов реакций. Разработана физико-химическая модель травления.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, ниобат лития, скорость травления, методы электронной микроскопии, рентгеновской микроанализ, физико-химическая модель взаимодействия.

ВВЕДЕНИЕ

Ниобат лития обладает уникальной совокупностью электрических, оптических и других свойств, что делает его одним из самых перспективных материалов для создания устройств функциональной электроники, микросистемной техники и нелинейной оптики. Однако трудности его размерной обработки в значительной мере сдерживают изготовление приборов на его основе. Поэтому представляет интерес изучение кинетики, механизма и особенностей плазмохимического травления (ПХТ) этого материала для создания рельефа на поверхности, удаления механически нарушенных слоев и модификации поверхностных свойств.

Процессы взаимодействия поверхности ниобата лития с фторсодержащей газоразрядной плазмой интересны еще и тем, что при их проведении на поверхности твердого реагента (LiNbO_3) образуется твердый продукт (LiF), изучение кинетики и механизма образования которого имеет самостоятельное значение.

В настоящее время значительно возрос поток информации, касающейся тех или иных проблем травления ниобата лития во фторсодержащей плазме. В литературе появились сообщения о его травлении в разрядах CF_4 [1], CHF_3 [2], C_3F_8 [3] и SF_6 [4], а также смесях этих газов с He , Ne , O_2 и Ar . Однако скорости обработки, полученные в этих работах, малы и не всегда устраивают разработчи-

ков промышленных технологий. Кроме того, экспериментальные данные, полученные в разных средах и на разных установках, часто неодинаковы, а порой и противоречивы. Поэтому целью настоящей работы было систематическое изучение кинетики, механизма и особенностей высокоскоростного ПХТ монокристаллического ниобата лития в ВЧ газоразрядной плазме.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по травлению проводились на лабораторной установке с реакционно-разрядной камерой (РПК) ВЧ диодного типа с несимметричными электродами. Применение асимметричной системы возбуждения разряда позволило увеличить энергию и концентрацию ионов, бомбардирующих обрабатываемые поверхности, без изменения величины подводимой к разряду мощности [5]. Для возбуждения газоразрядной плазмы использовался ВЧ генератор с частотой 13,56 МГц и регулируемой мощностью до 0,5 кВт. В качестве травящих газов применялись SF_6 , CF_4 и их смеси с O_2 , N_2 и Ar . Исследования проводились на полированных и шлифованных пластинах LiNbO_3 Y-среза размером $15 \times 8 \times 1,5$ мм. Процессы ПХТ осуществлялись в диапазоне давлений (10—100) Па.

Фазовый состав твердых продуктов реакции определялся методом рентгеновской дифракции (ДРОН-4М), элементный состав — методами рентгеновского микроанализа (энергодисперсионная

приставка INCA Energy 250 к электронному микроскопу JSM-6380LV), масс-спектрометрии с лазерным возбуждением ионной пробы (ЭМАЛ-1) и обратного рассеяния Резерфорда (ОРР). Изменение морфологии после ПХТ изучалось на растровом электронном микроскопе (JSM-6380LV) и атомно-силовом (СЗМ Solver R47-PRO) микроскопах.

Скорости травления определялись методом микровзвешивания пластин до и после обработки на аналитических весах ВЛАО-200г-1 с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ г. При этом твердый продукт, образовавшийся на поверхности LiNbO_3 , перед взвешиванием, в необходимых случаях, удалялся травлением в разбавленной H_2SO_4 . Экспресс измерения толщин проводились на измерителе с индикаторной головкой часового типа 1 МИГП с ценой деления 1 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении эксперимента было установлено, что ПХТ LiNbO_3 (НЛ) в газоразрядной плазме фторсодержащих газов является типичным топочимическим процессом, т.е. развивающимся не на границе раздела «газоразрядная плазма — твердое тело», а на границе раздела двух твердых фаз — исходного вещества и твердого продукта взаимодействия. На обрабатываемой поверхности образовывался твердый продукт реакции, поверхностный слой которого с увеличением времени обработки ($t_{\text{обр}}$), температуры (T) и величины подводимой к разряду мощности (W) изменял цвет от светло бурого до черного. Внутренний же, более толстый слой, имел белый цвет. Пленка легко растворялась в кислотах, удалялась в деионизованной воде и даже стиралась салфеткой. Определение состава методами лазерной масс-спектрометрии и ОРР показало, что основными элементами, образующими ее, являются литий и фтор. Изучение структуры и фазового состава слоя на дифрактометре позволило установить, что он образован крупнозернистой поликристаллической пленкой фторида лития. Таким образом, как и следовало ожидать из анализа физических свойств фторидов и оксифторидов ниобия и лития, из кристаллической решетки ниобата лития происходило преимущественное удаление ниобия и кислорода, а нелетучий фторид лития оставался на поверхности.

Исследована кинетика травления LiNbO_3 . Типичные зависимости изменения скоростей травления (скоростей перемещения границы раздела твердых фаз матрицы кристалла и продукта реакции) от времени взаимодействия приведены на

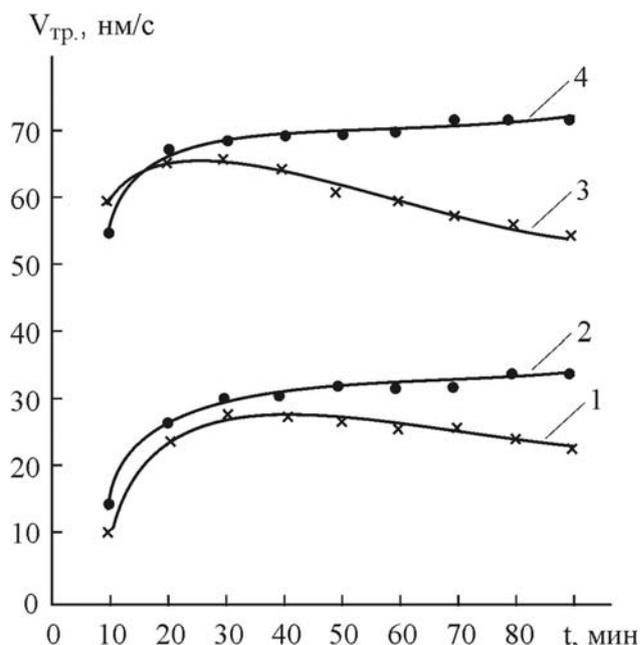


Рис. 1. Зависимость скорости перемещения границы раздела твердых фаз реагента (LiNbO_3) и продукта (LiF) от времени обработки: (1, 3 — LiF не удалялся в течение всего эксперимента; 2, 4 — LiF удалялся каждые 10 минут, 1, 2 — $P_{\text{SF}_6} = 53$ Па, $W = 1,2$ Вт/см²; 3, 4 — $P_{\text{SF}_6} = 80$ Па, $W = 1,2$ Вт/см²)

рис. 1. Такие зависимости характерны для реакций газа с твердым телом, в результате которых образуется хотя бы один твердый продукт, т.е. для топочимических реакций.

На приведенном рисунке кривые 1 и 3 относятся к образцам, с которых слой продуктов реакции не удалялся в течение всего эксперимента, а 2 и 4 — для образцов, с которых образующийся продукт удалялся химическим травлением через каждые 10 минут. Причем каждая пара образцов (1, 2) и (3, 4) обрабатывалась одновременно в одной реакционно-разрядной камере.

При снятии кинетической кривой было получено, что в начальный период времени не фиксировалось никаких превращений обрабатываемой поверхности. Это можно объяснить наличием индукционного периода, связанного с ростом плохо проницаемой пленки твердого продукта реакции на начальном этапе. И лишь с помощью РЭМ при увеличении более 10000 крат можно было видеть образование отдельных точечных дефектов, вздутий и их объединение в кластеры (см. рис. 2 а, б). В дальнейшем происходило образование фазы нанопористого LiF . При этом формировались многочисленные поры, по которым в дальнейшем происходил преимущественный транспорт химически

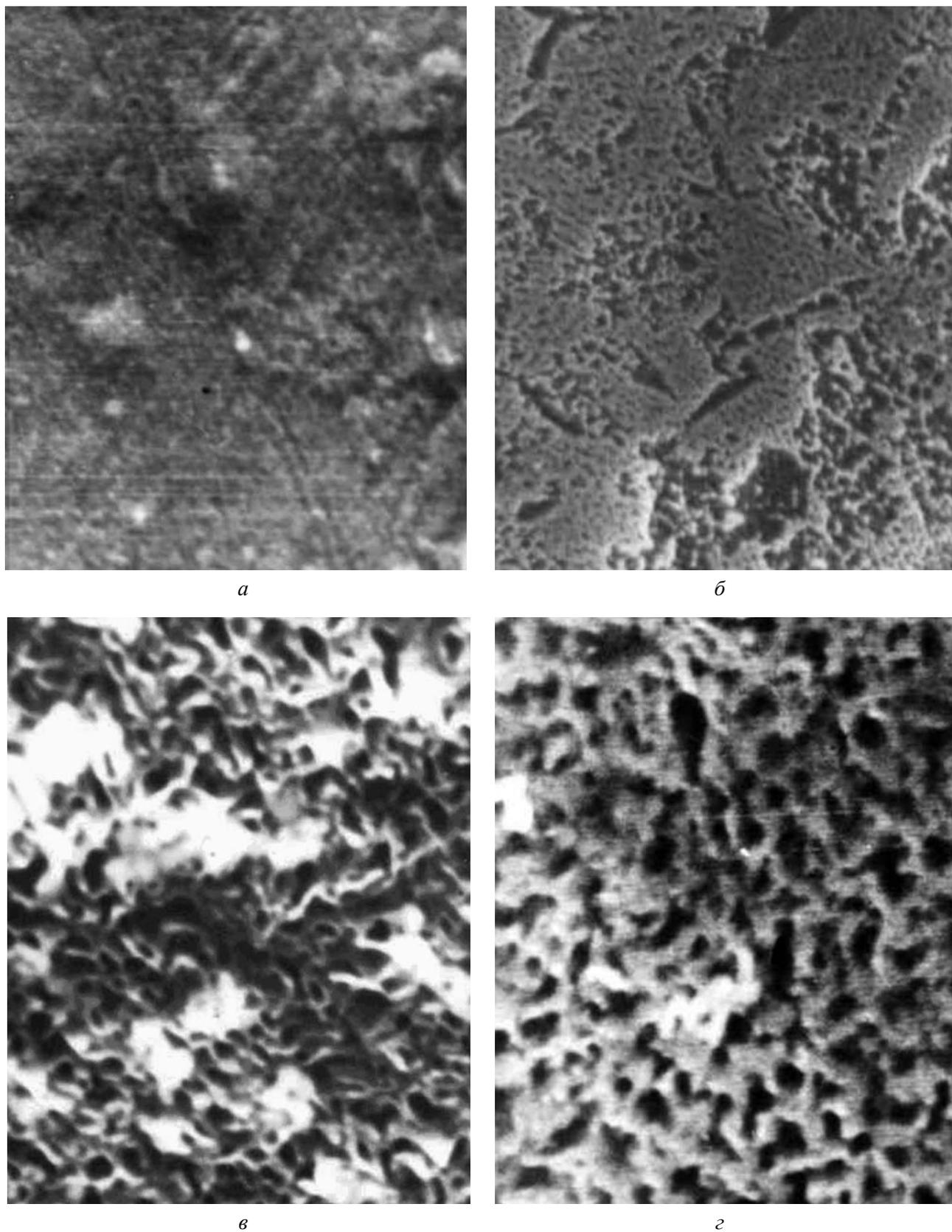


Рис. 2. РЭМ-фото изменения морфологии поверхностного слоя в процессе травления: *а* — индукционный период ($\times 15200$); *б* — образование и объединение центров взаимодействия ($\times 2600$); *в* — после ПХТ ($t_{\text{обр}} = 10$ мин, $T = 515$ К, $N = 1,5$ Вт/см 2 , $\times 7200$); *г* — после ПХТ ($t_{\text{обр}} = 20$ мин, $T = 515$ К, $N = 1,5$ Вт/см 2 , $\times 10000$)

активных частиц к месту взаимодействия и отвод газообразных продуктов реакций (рис. 2 в, з). После появления границы раздела фаз в гетероструктуре LiF — LiNbO₃, скорость реакции резко возрастала, достигала максимума и затем после образования слоя фторида лития более 100 мкм снижалась (рис. 1, кривые 1, 3).

Кривые 2, 4 рис. 1 показывают изменение скорости травления LiNbO₃ после удаления образующегося продукта через каждые 10 минут. Ход и сравнение кинетических кривых, приведенных на рис. 1, показывают, что наличие пленки твердого продукта незначительно тормозит реакции взаимодействия ниобата лития с фторсодержащими частицами плазмы. Так называемый фактор диффузионного торможения [6], равный отношению скорости реакции при наличии твердого продукта, к скорости реакции, которая наблюдалась бы при его отсутствии, в нашем случае даже при учете индукционного периода, был равен 0,7—0,9 в диапазоне давлений 40—100 Па. Следует заметить, что в случаях, когда диффузия сквозь слой растущего продукта является лимитирующей стадией процесса, кривая зависимости скорости его роста от времени проходит через максимум и постепенно снижается до весьма малых значений [6]. Отсутствие такой явно выраженной зависимости в нашем случае при толщинах слоя фторида лития в десятки и даже сотни микрон свидетельствует о том, что диффузия через этот слой не является лимитирующей стадией процесса взаимодействия, что вероятно связано с его пористостью.

Образование твердого продукта в таких реакциях приводит к тому, что взаимодействие химически активных частиц, образованных в плазме, собственно на поверхности обрабатываемого материала протекает лишь в начальный период. В это время скорость процесса ПХТ мала, и он может состоять из следующих стадий:

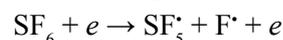
- 1) диффузия радикалов F[•] из газоразрядной плазмы к поверхности LiNbO₃;
- 2) адсорбция F[•] на поверхности LiNbO₃;
- 3) диффузия адсорбированных атомов фтора в внутрь твердого тела;
- 4) химическое взаимодействие атомов фтора с атомами Li, Nb и O с образованием летучих (NbF₅, NbOF₃, OF₂) и нелетучих (LiF) фторидов;
- 5) накопление газообразных продуктов в приповерхностном слое ниобата лития. На РЭМ-фото (рис. 2 а, б) видны вздутия, которые вполне могут быть интерпретированы как газообразные пузыри в поверхностном слое.

Эти пять стадий протекают в течение индукционного периода. По его окончании скорость травления LiNbO₃ скачкообразно возрастает, наступает период интенсивного травления, и реакция локализуется в области границы раздела двух твердых фаз — реагента и продукта реакции. В этом случае наблюдается повышенная реакционная способность твердого реагента (LiNbO₃) в области раздела фаз. Этот период в свою очередь предположительно состоит из следующих стадий:

- 1) «взрыв» газовых пузырьков, накопленных в приповерхностном слое, и образование пористых каналов (см. рис. 2 в и з);
- 2) диффузия фторсодержащих частиц через пористые каналы к поверхности раздела твердых фаз «продукт травления (LiF) — LiNbO₃»;
- 3) каталитическая диссоциация фторсодержащих частиц на поверхности пор;
- 4) каталитическое травление LiNbO₃ с образованием летучих и нелетучих продуктов;
- 5) десорбция и диффузия летучих продуктов в обратном направлении.

В газоразрядной плазме фторсодержащих газов, используемой для ПХТ материалов полупроводникового производства, наиболее активными частицами являются, прежде всего, свободные атомы и радикалы фтора (F[•]). Наиболее вероятными процессами их получения считаются следующие:

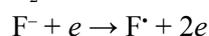
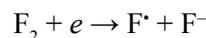
1. Диссоциация электронным ударом



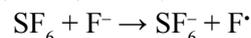
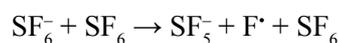
2. Диссоциативная ионизация



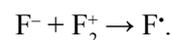
3. Диссоциативное присоединение и отрыв электрона



4. Ион-молекулярные реакции



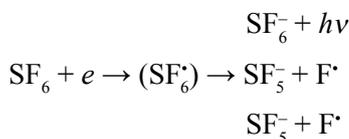
5. Ион-ионная рекомбинация



Химически активными частицами являются также молекулы F₂, радикалы C_xF_y[•] или S_nF_m[•] (x, y, n, m ≥ 1), положительные и отрицательные ионы. Роль каждой из отмеченных частиц в механизме травления в зависимости от конкретных условий различны и их вклад в конечный процесс не одинаков.

6. В электроотрицательных газах, к которым относится SF₆, возможно образование отрицатель-

ных ионов, т.е. молекул и атомов газа с «прилипшими» электронами. При столкновениях электронов с молекулами SF₆ даже при комнатных температурах возможно эффективное прилипание по схеме:



Состав плазмы значительно расширяется, если травление материалов осуществляется в газовом разряде смеси фторсодержащих газов с различными контролируруемыми и не контролируемым добавками (O₂, H₂, N₂, Ar и др.).

Приведенные выше всего шесть видов реакций естественно далеко не исчерпывают всего многообразия физико-химических взаимодействий в плазме SF₆, особенно если учесть влияние вторичных продуктов реакций и контролируемых и не контролируемых добавок к основному газу.

Исследовано влияние важнейших технологических параметров процесса на скорость травления LiNbO₃. На рис. 3 а и б показано влияние давления (P) SF₆ и плотности мощности (W). Эти параметры определяют основные внутренние характеристики газоразрядной плазмы — энергию, концентрацию, функцию распределения частиц по энергиям и другие. Оказалось, что зависимость скорости травления ниобата лития от давления имеет такой же

характер, что и аналогичные характеристики ПХТ кремния и других материалов в подобных условиях [7]. Температура подложки (T_{плд}) в экспериментах, приведенных на рис. 3а поддерживалась равной 510 К, время травления (t_{обр.}) составляло 15 мин.

На рис. 3б показано влияние W на скорость травления ниобата лития и Si (для сравнения) в плазме SF₆. Рост скорости ПХТ с увеличением подводимой к разряду мощности обычно объясняют увеличением скорости генерации химически активных частиц (ХАЧ) за счет электронного удара, так как при этом растет энергия электронов в плазме, а также повышением эффективности ионной бомбардировки, стимулирующей травление за счет физического распыления, очистки обрабатываемой поверхности от различных загрязнений и осадков, создания активных поверхностных центров. Из сравнения кривых 6 и 7 видно, что увеличение V_{тр} Si несколько меньше, чем V_{тр} LiNbO₃. Причем при увеличении W темп роста V_{тр} Si замедляется, а темп роста V_{тр} LiNbO₃, наоборот, возрастает. Такое поведение V_{тр} Si можно объяснить снижением скорости генерации ХАЧ в SF₆ за счет уменьшения вероятности диссоциативного прилипания электронов к этим молекулам, происходящим при росте энергии электронов, а разницу хода кривых для Si и LiNbO₃ — разным влиянием температуры на их скорости травления. Необходимо отметить, что в этих экспериментах не проводилось специальное

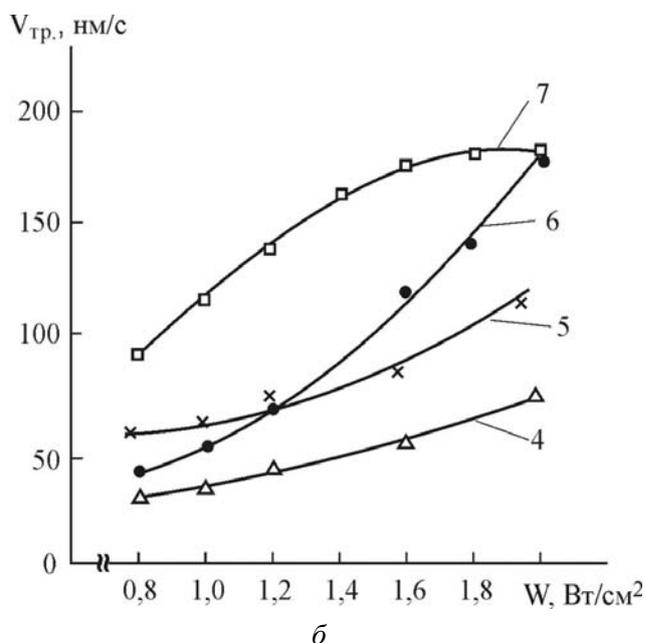
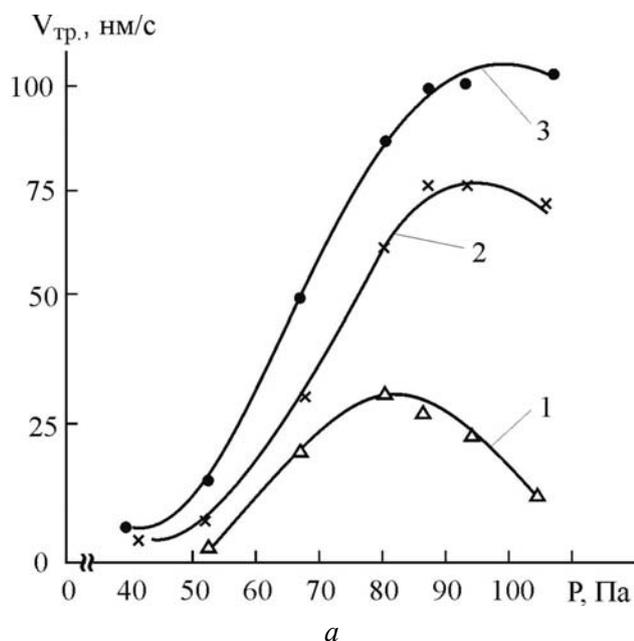


Рис. 3. Влияние давления (а) и плотности мощности (б) на скорости травления LiNbO₃ (1—6) и (для сравнения) Si (7) в плазме SF₆: W=0,8 (1); 1,1 (2); 1,4 (3) Вт/см²; P — 67 (4), 80 (5, 6, 7) Па; T_{плд}=510 (1—3); 550 (4, 5) К; не термостатировалась (6, 7)

термостатирование подложки (как это сделано для кривых 1 и 2) и при росте W от 1,0 до 2,0 Вт/см² поверхностная температура обрабатываемых материалов могла значительно (до 650 К) возрастать. При изменении температуры (например, на 100 °С) $V_{тр}$ Si изменяется не более, чем в 1,5 раза, а LiNbO₃, как будет показано ниже, — в 10—20 раз.

При проведении экспериментов по изучению кинетики ПХТ LiNbO₃ установлено, что скорость его травления в газоразрядной плазме SF₆ в 5—10 раз выше, чем в CF₄. Это различие объяснено более высокой скоростью генерации ХАЧ в разряде SF₆, связанной с меньшей энергией разрыва связи S—F в молекуле SF₆, чем связи C—F в молекуле CF₄. Кроме того, в разряде SF₆ значительный вклад в образование радикалов фтора вносит уже упоминавшийся процесс диссоциативного прилипания медленных электронов. Вклад этого процесса уменьшается при повышении средней энергии электронов в плазме.

Интересные результаты получены при изучении влияния температуры поверхности НЛ на скорости его травления. На рис. 4 показаны характерные зависимости для LiNbO₃ и Si (для сравнения), полученные при ПХТ в газоразрядной плазме SF₆. В первом случае это сложный топохимический процесс [6], во втором — обычный, достаточно хорошо изученный процесс гетерогенного взаимодействия в системе «газоразрядная плазма — поверхность твердого тела» [7]. Из рисунка видно, что в обоих процессах происходит

увеличение скоростей травления при росте температуры. Установлено, что процесс травления этих материалов начинался по достижении некоторой пороговой температуры $T_{пор.}$, величина которой для Si составляла ~ 220 К, а для НЛ — изменялась в пределах 400—475 К и в большей степени чем для Si зависела от режимов обработки. При травлении Si значения $T_{пор.}$ определялись, в основном, температурой кипения $T_{кип.}$ летучих продуктов обработки при заданном давлении, а скорости травления практически линейно возрастали в 2—2,5 раза при увеличении температуры обрабатываемой поверхности на 350 К в диапазоне 250—600 К. Для ПХТ Si при температуре превышающей 650 К рост скорости травления замедлялся, на обрабатываемой поверхности происходило осаждение труднолетучих продуктов, которые были видны даже через микроскоп МИИ-4. Несколько другие результаты получены при температурной стимуляции ПХТ НЛ.

Низкие значения скоростей травления LiNbO₃ при температуре подложки до 450 К можно объяснить наличием индукционного периода, в течение которого происходит формирование каналов в твердом продукте травления. В этом случае процесс травления лимитируется доставкой фторсодержащих радикалов к границе взаимодействия, а также десорбцией и удалением летучих продуктов травления от нее. Затем, после превышения пороговой температуры подложки, скорость травления резко возрастала, после чего замедлялась (при

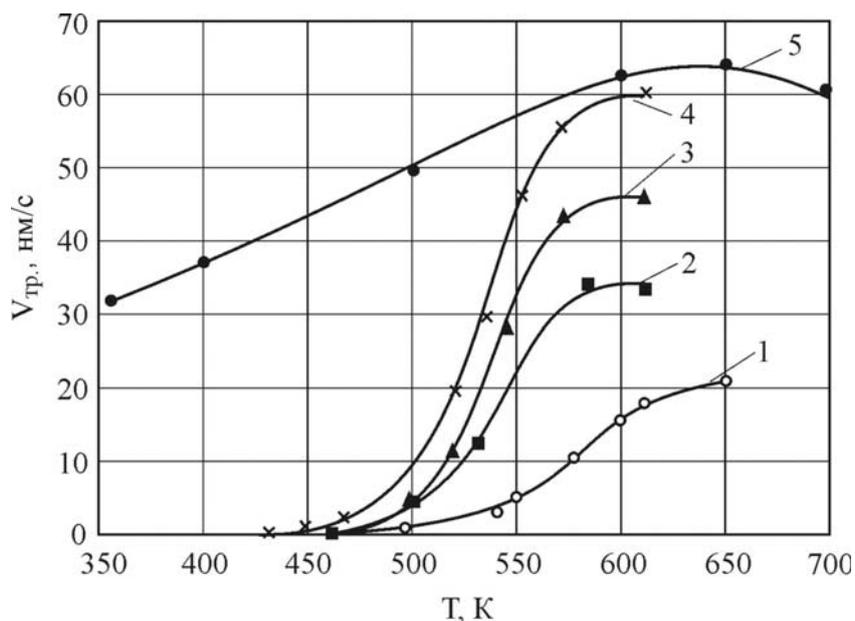


Рис. 4. Зависимость скорости ПХТ LiNbO₃ (1—4) и Si (5) от температуры: $W=0,8$ (1); 1,0 (2, 5); 1,2 (3); 1,5 (4) Вт/см²; $P=40$ (1); 53 (2—5) Па

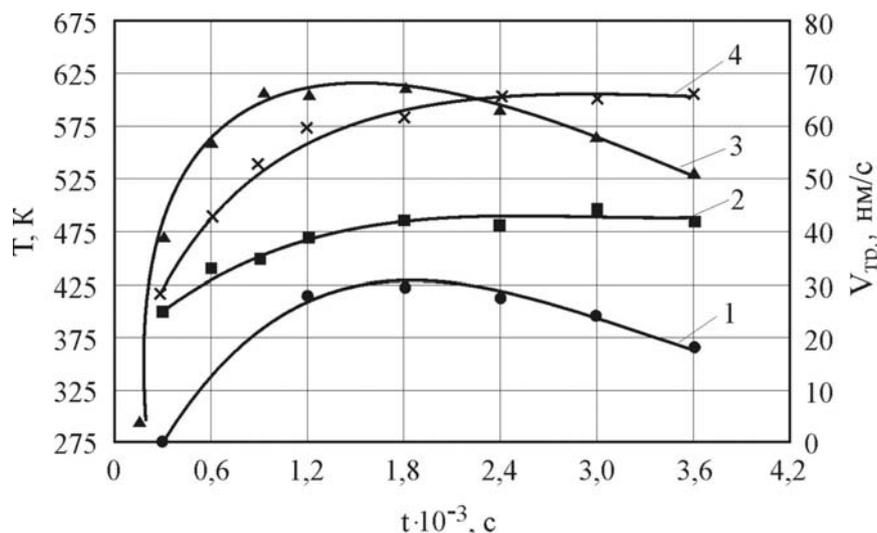


Рис. 5. Изменение температуры подложки (2, 4) и скоростей ПХТ LiNbO_3 (1, 3) от времени обработки: $W=1,0$ (1, 2); 1,5 (3, 4) Вт/см^2 ; $P=53 \text{ Па}$ (1—4)

$T \sim 575 \text{ К}$) и достигала максимального значения (насыщения).

На графиках температурной зависимости в аррениусовых координатах, построенной по данным рис. 4, всегда находились несколько участков, в пределах каждого из которых можно считать, что энергия активации не зависит от температуры и для определения ее величины допускается использование уравнения Аррениуса. Однако эти участки имели очень ограниченные пределы. Найденные значения энергии активации составляли $(54,5 \pm 8,2)$ кДж/моль для диапазона $475\text{—}575 \text{ К}$ и снижались до $5\text{—}10 \text{ кДж/моль}$ за его пределами.

Кроме того, по мере роста толщины слоя LiF на поверхности, видимо, постепенно меняется контролирующая стадия процесса взаимодействия, в связи с чем неминуемо должна изменяться и величина эффективной энергии активации. Таким образом, этот важнейший кинетический параметр зависит не только от температуры, но и от толщины образовавшегося слоя твердого продукта.

Анализ графиков температурной зависимости скоростей ПХТ LiNbO_3 показывает, что для получения надежных и воспроизводимых результатов необходимо термостатирование электродов и подложкодержателей, на которых располагаются образцы. В противном случае их температура и скорость травления будет функцией времени обработки. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости, подтверждающие этот вывод. Видно, что с момента зажигания разряда температура подложкодержателя поднимается до некоторой квазистационарной величины, соответствующей задан-

ным условиям. Этот фактор также влияет на изменение скорости травления в зависимости от времени обработки в плазме и на продолжительность индукционного периода. В этих экспериментах при снятии каждой зависимости температуры образца от времени обработки (кривые 2, 3) проводился нагрев образцов до $400\text{—}420 \text{ К}$ в воздушной плазме для обеспечения одинаковых стартовых условий. Обычно для этого было достаточно $5\text{—}6$ мин.

Интересные результаты получены при изучении травления LiNbO_3 в плазмах смесей газов $\text{SF}_6 + \text{O}_2$, $\text{SF}_6 + \text{Ar}$, $\text{SF}_6 + \text{N}_2$, $\text{SF}_6 + \text{воздух}$ и $\text{SF}_6 + \text{CF}_4$. Оказалось, что увеличение содержания O_2 в смеси до $20\text{—}30$ объемных % приводит к некоторому увеличению $V_{\text{тр}}$ LiNbO_3 (на $20\text{—}50$ %), хотя и менее значительному, чем при ПХТ Si (на $70\text{—}100$ % при содержании $\text{O}_2 = 15$ %). Такая разница в количественном влиянии добавки O_2 на $V_{\text{тр}}$ этих материалов вполне понятна, если учесть, что в процессе травления ниобата в РПК дополнительно выделяется кислород. При дальнейшем увеличении содержания O_2 в смеси с SF_6 происходил спад скоростей травления. Добавление Ar и N_2 к SF_6 вплоть до 50 % увеличивало $V_{\text{тр}}$ LiNbO_3 в $1,5\text{—}2$ раза. Достаточно высокие скорости травления были получены даже при $70\text{—}80$ % содержании добавок. При увеличении обрабатываемой площади LiNbO_3 эти значения уменьшались. При травлении в смеси $\text{SF}_6 + \text{CF}_4$ наблюдалось снижение скоростей обработки LiNbO_3 . Такое поведение $V_{\text{тр}}$ разумно объяснить разбавлением легко диссоциирующего газа (SF_6) труднодиссоциирующим.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхностей LiNbO_3 после ПХТ и последующего удаления слоя LiF

Поверхность	d , мкм	R_{\max} , нм	R_z , нм	R_h , нм	R_a , нм	R_g , нм
Полированная	0	169,3	86,0	90,7	24,2	28,9
	10	272,3	136,2	136,2	42,8	51,4
	50	311,2	154,6	154,7	50,2	59,8
	100	350,3	173,5	178,1	57,3	68,8
Шлифованная	0	1012,7	508,4	488,1	177,3	220,8
	10	944,5	488,2	480,0	171,3	204,8
	50	526,1	270,2	270,0	99,1	103,2
	100	341,5	160,4	163,5	49,7	54,2

d — толщина стравленного слоя, R_{\max} — наибольшая высота неровностей профиля, R_z — высота неровностей профиля по десяти точкам, R_h — средняя высота неровностей, R_a — среднее арифметическое отклонение профиля, R_g — средняя квадратичная шероховатость

Для ПХТ LiNbO_3 , также как и для Si и многих других материалов, наблюдался эффект загрузки, проявляющийся в снижении скоростей травления при увеличении обрабатываемой площади.

В ходе экспериментов установлено, что скорости травления кристаллов ниобата лития, полученных от разных производителей, отличаются на 15—20 % при одновременной обработке. Это, видимо, связано с тем, что полированные и шлифованные поверхности часто имеют больший разброс по чистоте обработки, размерам и плотности царапин и количеству поверхностных дефектов. Кроме того, они имеют непостоянный состав и содержат избыток одного из компонентов или даже посторонние примеси [8].

Методом атомно-силовой микроскопии исследовано изменение шероховатости шлифованных и полированных поверхностей пластин LiNbO_3 . Применялись методики топографии и отображения фазы. Анализ проводился в полуконтактном режиме сканирования, при этом использовался кантилевер NSG20.

Было установлено, что технологические режимы обработки не оказывают заметного влияния на характеристики микрорельефа, которые, видимо, определяются лишь химическими процессами на границе раздела «твердый продукт — твердый реагент». Оказалось, что наибольшее влияние на основные параметры шероховатости оказывает глубина перемещения этой границы. В табл. 1 приведены данные, определенные с помощью гистограмм, полученных при реализации метода Roughness Analysis. Видно, что основные параметры, характеризующие изменение шероховатости шлифованных поверхностей, с увеличением толщины

стравленного слоя заметно улучшаются. Однако полного споллировывания микрорельефа, характерного для жидкостного химического травления, не происходило. Поверхность была матовой. При травлении же полированных поверхностей, наоборот, наблюдалось увеличение их шероховатостей. Причем, при удалении слоя LiNbO_3 толщиной ~ 100 мкм происходило сравнение исследуемых характеристик полированных и шлифованных поверхностей, что, видимо, связано с накоплением дефектов при их травлении.

Проведены исследования возможности травления глубоких микроструктур в LiNbO_3 , необходимых, например, для изготовления элементов микроэлектромеханической техники. В качестве материалов, маскирующих травление, использовались пленки Al толщиной 0,7 мкм и фоторезиста ФП-383 толщиной около 1 мкм. Селективность травления $S = V_{\text{тр. LiNbO}_3} / V_{\text{тр. Al}}$ составляла около 100, а для фоторезиста — 5. Установлено, что для ПХТ LiNbO_3 , также как и для других материалов, характерно боковое подтравливание под край маски. Причем анизотропия травления оказалась невысокой и изменялась от 0,3 до 0,8 при изменении давления SF_6 от 20 до 100 Па. При использовании в качестве активных газов CF_4 или CHF_3 значение анизотропии уменьшалось на (10—15) %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования, направленные на углубление представлений о механизме плазмохимического травления ниобата лития, показали сложность и многообразие процессов, лежащих в их основе. Следует признать, что в настоящее время плазменные методы трав-

ления LiNbO_3 еще только развиваются, однако уже сейчас нет сомнений относительно возможности и перспективности их применения в технологии функциональной электроники, микросистемной техники и нелинейной оптики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee C. L., Lu C. L. // Appl, Phys, Lett. 1979. V. 35. № 10. P. 756—758.
2. Shima K., Mitsugi N., Nagata H. // Material Research Society. 2007. V. 49. № 8. P. 257—259.
3. Park W. J., Yang W. S., Kim W. K., et al. // Optical Materials. 2006. V. 28. P. 216—220.
4. Гольдфарб В. А., Дикарев Ю. И., Петраков В. И. // Матер. VI междунар. научн.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2000. Т. 3. С. 1954—1960.
5. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостной разряд: Физика. Техника эксперимента. М.: Наука. Физматлит, 1995. 320 с.
6. Розовский А. Я. Гетерогенные химические реакции (кинетика и макрокинетика). М.: Наука, 1980. 324 с.
7. Данилин Б. С., Куреев В. С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
8. Кузьминов Ю. С. Электрооптический и нелинейно оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 264 с.

Гуляев Вячеслав Валентинович — аспирант кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета; тел.: 8(920) 2170651, e-mail: vv_gulyaev@mail.ru

Дикарев Юрий Иванович — к.т.н., доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета; тел.: 8(4732) 208917

Рубинштейн Владимир Михайлович — к.т.н., старший научный сотрудник кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208917

Цветков Сергей Михайлович — научный сотрудник кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208917

Бормонтов Евгений Николаевич — д. ф.-мат.н, профессор, зав. кафедрой физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208917

Gulyaev Vyacheslav V. — the post-graduate student of chair «Physics of Semiconductors and Microelectronics», Voronezh State University; tel: 8(920) 2170651, e-mail: vv_gulyaev@mail.ru

Dikerev Jury I. — PhD (technical sciences), senior lecturer of chair «Physics of Semiconductors and Microelectronics», Voronezh State University; tel.: 8(4732) 208917

Rubinstein Vladimir M. — PhD (technical sciences), senior scientific employee of chair «Physics of Semiconductors and Microelectronics», Voronezh State University; tel.: (4732) 208917

Tsvetkov Sergey M. — scientific employee of chair «Physics of Semiconductors and Microelectronics», Voronezh State University; tel.: (4732) 208917

Bormontov Evgenie N. — grand PhD (physical and mathematical sciences), professor, chief of the chair «Physics of Semiconductors and Microelectronics», Voronezh State University; tel.: (4732) 208917