

## Влияние электронного насыщения таммовских уровней на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния

© Р.К. Яфаров

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
410019 Саратов, Россия  
e-mail: pirpc@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 23 декабря 2016 г.)

Показано влияние плазмохимической модификации морфологии и состава поверхностной фазы на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния. Установлено, что электронное насыщение таммовских уровней в процессе получения атомно-чистых поверхностей кристаллов кремния и стабилизирующая пассивация поверхностных атомов в высокоионизированной микроволновой плазме с использованием хладона-14 позволяет по сравнению с пластинами с естественным оксидным покрытием или после их ионно-физического травления в среде аргона более чем в два раза уменьшить пороги напряженности электрического поля, при которых начинается полевая эмиссия электронов, и более чем на порядок увеличить максимальные плотности автоэмиссионных токов. Рассмотрены физико-химические механизмы, ответственные за модификацию поверхности и автоэмиссионных характеристик кристаллов кремния.

DOI: 10.21883/JTF.2017.10.45004.2146

### Введение

В вакуумной микроэлектронике одним из наиболее привлекательных материалов для полевых источников электронов при создании активной элементной базы остается кристаллический кремний. В первую очередь это обусловлено развитой технологической базой, а также обнаруженными люминесцентными свойствами нанокристаллического кремния, которые позволяют надеяться на создание в будущем сверхбыстродействующих радиационно стойких кремниевых интегральных схем с оптической связью.

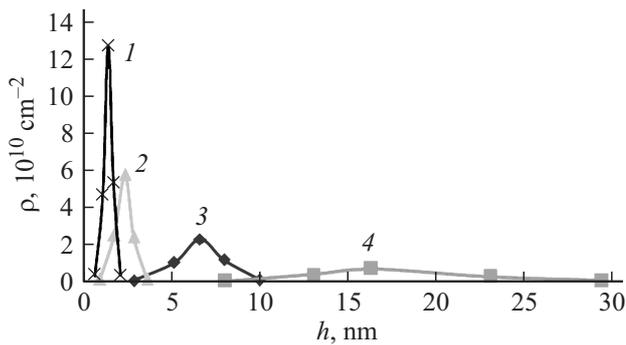
Недостатками полевых источников электронов на основе кремния являются высокая чувствительность к состоянию поверхности и низкие плотности автоэмиссионных токов, которые, как правило, находятся в интервале  $50\text{--}150\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Так, в работе [1] сотрудников Массачусетского технологического института для плотного массива эмиттеров в виде высокоаспектных пиков из кремния *n*-типа, созданных с помощью микротехнологии, получены значения максимальной плотности автоэмиссионного тока  $J = 145\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$  при напряженности поля анода  $E = 32\ \text{V}/\mu\text{m}$ . Однако использование высокоаспектных эмиттеров, а также различных конструктивных решений, направленных на повышение фактора усиления поля  $\beta$  путем уменьшения радиусов эмиттирующих острий, диаметров отверстий в управляющих электродах или создания нанолезвийных планарных структур, приводит к усложнению технологии изготовления и сопровождается, как правило, снижением надежности и увеличением себестоимости автоэмиссионных устройств [1,2]. В связи с этим большой как фундаментальный, так и прикладной интерес представляют исследования альтернативных путей, направленных на повышение воспроизводимости и улучшение эмиссионных характеристик автокатодов, которые были бы связаны не только с конструктивными, но и с физико-химическими модификациями эмиттирующих поверхностей кремниевых кристаллов.

Целью работы являлись исследования возможности плазмохимической модификации морфологии и автоэмиссионных свойств полевых источников электронов, изготовленных на основе кристаллов кремния.

1. **Методика и результаты экспериментов**

### 1. Методика и результаты экспериментов

Эксперименты по модификации поверхностных свойств кристаллов кремния проводились в установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2.45 GHz [3]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли соответственно 250 W и 875 G. В качестве рабочих газов для плазменного удаления естественного оксидного покрытия на кремнии использовались хладон-14 и аргон. Давление газов в процессах обработки было равным 0.1 Pa. В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния Si (100) электронного типа проводимости с удельным сопротивлением  $0.01\text{--}0.02\ \Omega \cdot \text{cm}$ . Величины ускоряющих напряжений ( $U_{sm}$ ) на подложкодержателе были фиксированными и равными  $-100$  и  $+100$  V в процессах плазмохимического травления в среде хладона-14 и  $-100$  V при ионно-физическом травлении с использованием аргона. Глубина травленного слоя составляла во всех случаях около 100 nm. В качестве контрольных образцов для сравнения автоэмиссионных характеристик использовались пластины кремния с естественным оксидным покрытием. Измерения морфологических характеристик поверхностей как до



**Рис. 1.** Распределения поверхностных плотностей высот выступов на кремнии *n*-типа до (2) и после травления в плазме аргона (1) и хладона-14 при  $U_{см} = -100$  (3) и  $100$  В (4).

травления, так и после травления кремния проводились с использованием сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver-P-47. В качестве зондов использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления  $10$  нм и жесткостью  $0.1$  Н/м. Поле сканирования составляло  $3 \times 3$   $\mu\text{m}$  при шаге сканирования  $8$  нм и шаге ЦАП пьезосканера по оси *Y* равном  $0.24$  нм. Схема регистрации отклонения кантилевера обеспечивает разрешение  $0.1$  нм при шаге АЦП пьезосканера по оси *Z*, равном  $0.05$  нм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения этого микроскопа. Автоэмиссионные свойства исследовались в условиях высокого вакуума ( $10^{-5}$  Па) на диодной структуре, позволяющей изменять расстояние между электродами с точностью до  $1$   $\mu\text{m}$ .

На рис. 1 приведены распределения поверхностных плотностей высот выступов на пластинах кремния *n*-типа до и после их плазменного травления при различных смещениях в среде хладона-14 и аргона. Видно, что пластины после низкоэнергетичного ионно-физического травления с использованием аргона имеют наименьшую высоту выступов и наибольшую их поверхностную плотность, а наибольшую высоту, которая превосходит исходную более чем в 7 раз, и наименьшую поверхностную плотность, имеют пластины после травления в плазме хладона-14 при положительном смещении. Соответствующие АСМ-изображения морфологии пластин приведены на рис. 2.

В таблице приведены морфологические и автоэмиссионные характеристики пластин кремния (100) *n*-типа с естественным оксидным покрытием и после травления в плазме различных газовых сред и напряжений смещения. Усредненное расстояние между выступами получено расчетом из соответствующих поверхностных плотностей. За порог начала автоэмиссии принята напряженность поля, при которой плотности автоэмиссионных токов превышали  $40$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . На рис. 3 построены зависимости параметров автоэмиссии от высоты и расстояния между выступами на исходных пластинах кремния и

после травления в плазме различных газовых сред. Из приведенных экспериментальных данных видно, что при плазменной обработке в среде хладона-14 существенно увеличиваются максимальные автоэмиссионные токи при одновременном уменьшении порогов автоэмиссии. Большое влияние на автоэмиссионные характеристики оказывает знак потенциала смещения на подложкодержателе. Порог автоэмиссии при положительном смещении уменьшается по сравнению с автоэмиссией с исходных пластин кремния с естественным оксидным покрытием более чем в два раза. Максимальная плотность тока автоэмиссии практически на порядок превышает максимальную плотность тока после обработки пластин в плазме аргона.

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Формирование морфологии поверхности кристаллов кремния при микроволновом плазмохимическом травлении

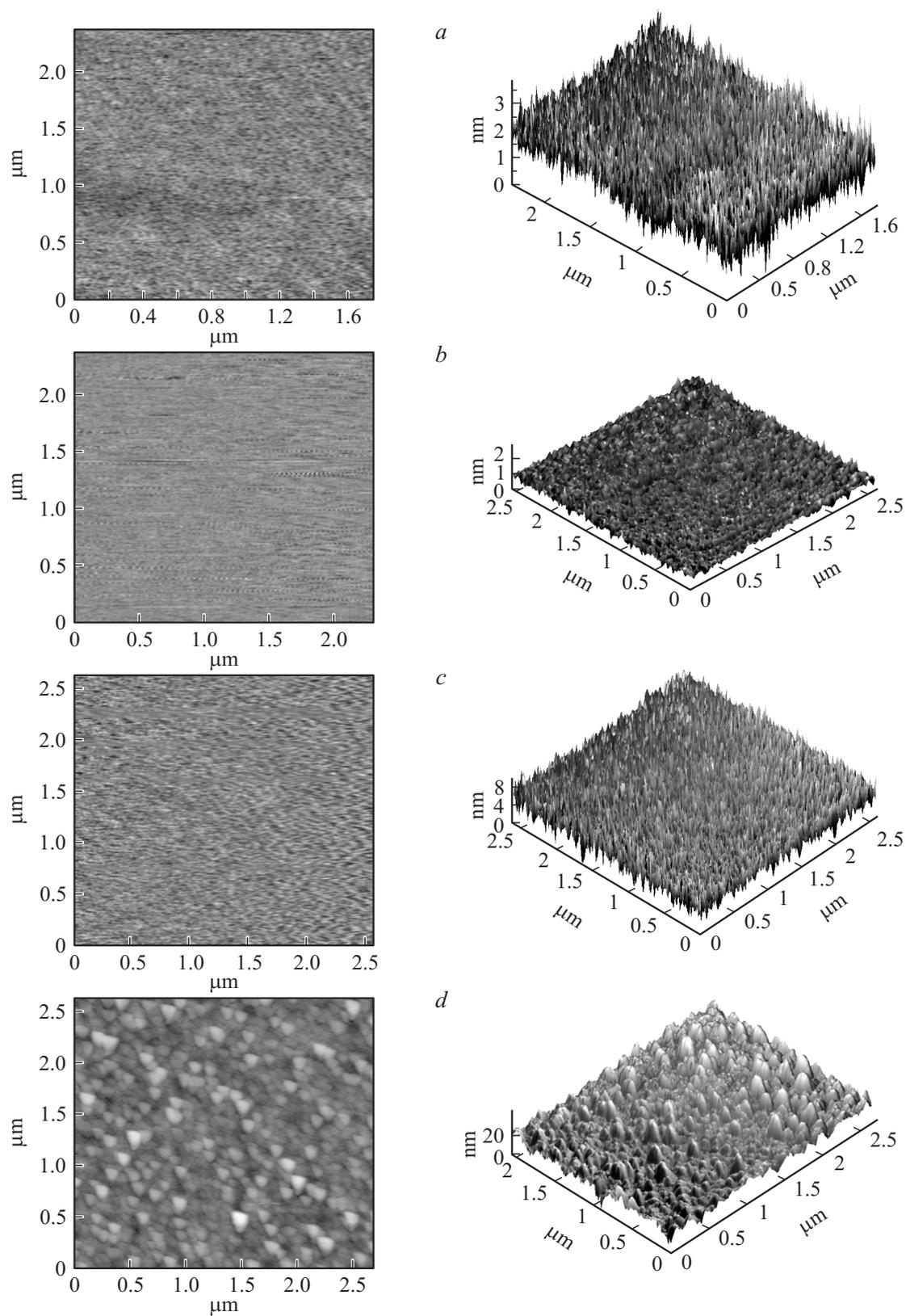
В случае использования плазмы аргона травление пластин кремния с естественным оксидным покрытием осуществляется по ионно-физическому механизму за счет распыления поверхностных атомов кремния и частиц его естественного окисла ускоренными ионами. При наклонном падении ионов на поверхность мишени скорость травления определяется выражением

$$V(\alpha) = 6.25 \cdot 10^{25} \left[ \frac{j_i S(\alpha) A}{N_A \rho} \right] \cos \alpha, \quad (1)$$

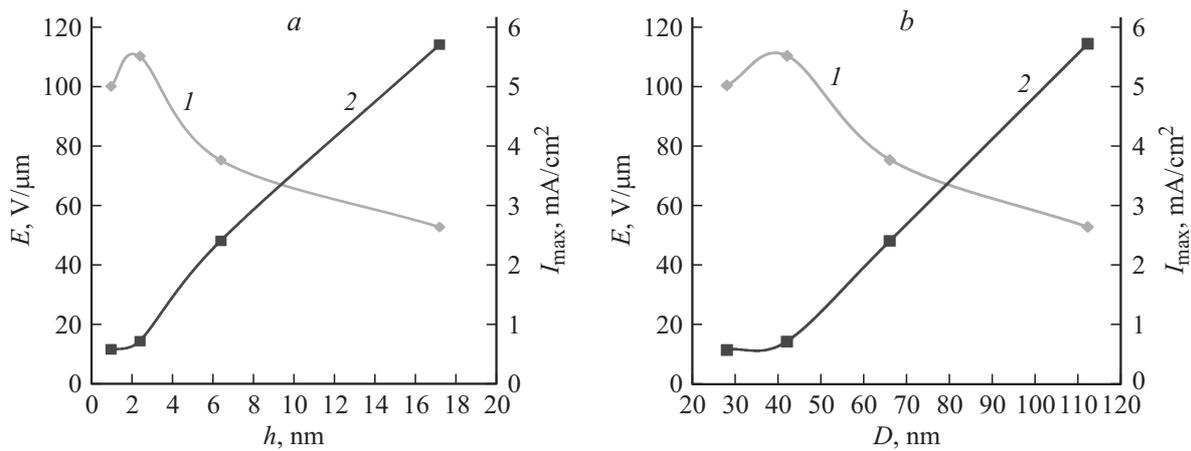
где  $A$  — атомный вес распыляемого материала, г/моль;  $N_A$  — число Авогадро, ат/моль;  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $j_i$  — плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению поступления ионов, А/см<sup>2</sup>;  $S(\alpha)$  — коэффициент распыления материала при угле падения ионов  $\alpha$  относительно нормали к поверхности.

Практически у всех материалов с увеличением угла падения ионов на поверхность от  $0^\circ$  до  $60$ – $70^\circ$  наблюдается увеличение коэффициента распыления, которое в случае травления окислов кремния может достигать пятикратного значения относительно нормального падения ионов аргона [4]. За счет различной интенсивности распыления, обусловленной статистической неоднородностью геометрии и толщины стенок углублений, и релаксации упругих напряжений в поверхностном слое пластины выступы с наибольшим углом наклона граней при увеличении длительности обработки постепенно исчезают. Это приводит к уменьшению и выравниванию высот выступов, вследствие чего их максимальная поверхностная плотность по отношению к исходной поверхности кремния с естественным оксидным покрытием увеличивается (рис. 1, кривая 1).

При плазмохимическом травлении кристаллов кремния в среде  $\text{CF}_4$  вид, плотность потока и энергия заряженных частиц (электронов и химически активных



**Рис. 2.** АСМ-изображения поверхности кристаллов кремния *n*-типа до (а) и после (б) травления в плазме аргона и хладона-14 при  $U_{\text{sm}} = -100$  (с) и 100 V (d).



**Рис. 3.** Зависимости напряженностей электрического поля порога (1) и максимальных плотностей токов (2) автоэмиссии пластин кремния (100) *n*-типа от высоты (а) и расстояния между выступами (б) до и после плазменного травления в различных газовых средах.

Влияние смещения и среды плазменной обработки на параметры морфологии и автоэмиссии кристаллов кремния (100) *n*-типа проводимости

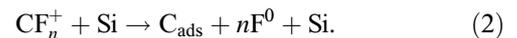
Режим плазменной обработки	Хладон-14		Аргон	Без обработки
	-100 V	+100 V	-100 V	
Высота выступов <i>h</i> , nm	6.4	17.2	1.0	2.4
Плотность выступов $\rho \cdot 10^{10}$ , cm <sup>-2</sup>	2.3	0.8	12.8	5.8
Расстояние между выступами <i>D</i> , nm	66	112	28	42
<i>E</i> , V/μm	75	52.5	100	110
<i>J</i> <sub>max</sub> , mA/cm <sup>2</sup>	2.4	5.7	0.6	0.7

ионов), поступивших на поверхность, зависят от величины и знака потенциала смещения на подложкодержателе. Интегральным результатом протекания гетерогенных химических реакций между поверхностными атомами и структурными частицами плазмы является ослабление связей поверхностных атомов кремния с подложкой и их удаление в результате образования летучих продуктов реакций в виде SiF<sub>4</sub>-соединений и активированной десорбции SiF<sub>2</sub>-комплексов под воздействием электронно-ионной бомбардировки [3].

При отрицательном смещении на подложкодержателе основными химически активными частицами бомбардирующими поверхность кремния являются положительные ионы C<sup>+</sup>, CF<sub>*n*</sub><sup>+</sup>, где *n* = 1–4, а также радикалы CF<sub>*n*</sub> и нейтральные атомы фтора, углерода и CF<sub>4</sub>. При положительном смещении, кроме радикалов CF<sub>*n*</sub>, молекул хладона-14 и атомов фтора, основными заряженными компонентами плазмы, поступающими на поверхность кремния, являются электроны и отрицательные ионы фтора.

Поступление из плазмы двух видов частиц — нейтральных и ионизированных — определяет и два вида их взаимодействия с поверхностными атомами кремния: гетерогенные химические реакции с образованием летучих соединений и физические эффекты, связанные с

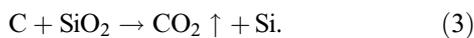
ионной и/или электронной бомбардировкой. При СВЧ плазменной обработке с давлениями рабочих газов около 0.1 Па реализуется режим слабой адсорбции, который характеризуется низкой степенью заполнения поверхности адсорбированными газовыми частицами. В режиме слабой адсорбции при плазмохимическом травлении с отрицательным смещением наиболее вероятным является процесс, при котором ускоренный электрическим смещением углеродосодержащий ион вида CF<sub>*n*</sub><sup>+</sup>, где *n* = 0–4, при ударе о поверхность диссоциирует на атомы углерода и фтора (ионно-индуцированная или ударная диссоциация молекулярного иона [3]), которые затем активно взаимодействуют с поверхностными атомами кремния и его оксидного покрытия:



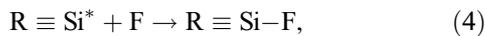
При положительном смещении на подложкодержателе бомбардировка поверхности кремния положительными углеродосодержащими ионами практически отсутствует. В этом случае наиболее вероятным является механизм травления, при котором ускоренные полем подложкодержателя электроны осуществляют гетерогенную диссоциацию и ионизацию адсорбированных молекул и радикалов рабочего газа с взаимодействием последних с поверхностными атомами оксида кремния и обра-

зующейся атомно-чистой поверхности. Из-за низкого коэффициента аккомодации, обусловленного большим различием масс атомов и электронов, кинетическая энергия, передаваемая атому или молекуле при столкновении с электроном, достаточно мала. Это снижает скорость активации и десорбции атомов адсорбата и низколетучих продуктов химических реакций. Результирующая скорость плазмохимического травления кремния при  $U_{sm} = +100$  В составляет около 5.1 nm/min. Она более чем в 4 раза меньше скорости травления при  $U_{sm} = -100$  В, которая составляет 21.3 nm/min.

На начальных стадиях травления атомы углерода на поверхности участвуют в восстановлении  $\text{SiO}_2$  с образованием летучих соединений его окислов:



После удаления оксидного слоя ненасыщенные связи поверхностных атомов кремния пассивируются в результате хемосорбции как атомами углерода с образованием  $\equiv \text{Si}-\text{CF}_m$ , где  $m = 0-3$ , ковалентных связей между кремнием и углеродом с энергией 4.55 eV, так и атомами фтора с образованием более устойчивых и высокополяризованных  $\text{Si}-\text{F}$ -комплексов с энергией связи, равной 5.6 eV, ориентированных нормально поверхности кремния, согласно реакции



где R — кристаллическая решетка кремния.

Наиболее вероятными механизмами удаления комплексов  $\text{Si}-\text{F}$  с поверхности кремния, в результате которого осуществляется травление, являются [3]: 1 — образование адкомплексов  $\text{SiF}_2$ , которые уже сравнительно легко (пороговая энергия радиационно-стимулированной десорбции для них составляет доли eV) могут быть десорбированы с поверхности кремния последующим ионным ударом, и 2 — образование легко летучего соединения  $\text{SiF}_4$  в результате взаимодействия двух адкомплексов  $\text{SiF}_2$  между собой.

При первом механизме удаления комплексов  $\text{Si}-\text{F}$  с поверхности кремния скорость ионно-индуцированного травления ( $V_j$ ) пропорциональна плотности ионного тока на подложку и степени заполнения поверхности адкомплексами  $\text{SiF}_2$  [3]:

$$V_j = K j \theta \alpha, \quad (5)$$

где  $K$  — коэффициент распыления, т.е. вероятность десорбции комплекса  $\text{SiF}_2$  при попадании в него иона,  $j$  — поток ионов фтора на поверхность кристалла,  $\theta$  — степень заполнения поверхности адкомплексами  $\text{SiF}_2$ ,  $\alpha = M/(N_0 \rho)$ ,  $M$  — молярная масса кремния,  $\rho$  — плотность,  $N_0$  — число Авогадро. В этом механизме преобладающим является образование на поверхности кремния после окончания процесса  $\equiv \text{Si}-\text{CF}_m$ ,  $\equiv \text{Si}-\text{CF}_2-\text{Si} \equiv$  и др. фторуглеродных комплексов [5].

Другой механизм удаления поверхностных атомов кремния в виде легко летучего соединения  $\text{SiF}_4$  является

преимущественным в случае высокой степени заполнения поверхности адкомплексами  $\text{SiF}_2$ . Он реализуется при положительном смещении и обусловлен отсутствием ионной бомбардировки и неоднородностью распределения химического адсорбата по поверхности кремния. Наибольшая его концентрация реализуется в углублениях рельефа поверхности, где свободная энергия системы поверхность—плазма имеет минимальные значения. В условиях интенсивной электронной бомбардировки, которая осуществляет гетерогенную активацию химического адсорбата и подложки, это повышает степень заполнения адкомплексами  $\text{SiF}_2$  и увеличивает скорость растравливания углублений в результате изотропного по своей природе химического процесса, связанного с образованием летучего соединения  $\text{SiF}_4$ . В этом случае скорость спонтанного, изотропного по своей природе процесса пропорциональна квадрату степени заполнения поверхности кремния адкомплексами  $\text{SiF}_2$  [3]:

$$V_s \approx \theta^2. \quad (6)$$

С увеличением длительности травления за счет бокового растрывания стенок между отдельными углублениями поверхностная плотность выступов уменьшается, а их высоты увеличиваются (рис. 1, кривые 3, 4).

## 2.2. Взаимосвязь морфологии и автоэмиссионных свойств кристаллов кремния

Поверхность кремния легко окисляется, при экспозиции кремниевой подложки в атмосфере происходит быстрое формирование окисной пленки. Основным процесс, происходящий при этом, заключается в перераспределении валентных электронов между кремнием и кислородом с выделением большого количества тепла. Константа скорости роста окисла связана с кинетикой протекания реакции на границе раздела фаз и зависит от скорости, с которой атомы кремния переходят в окисную фазу. Поэтому скорость реакции окисления кремния лимитируется плотностью разорванных  $\text{Si}-\text{Si}$ -связей подложки. В процессе ионно-физического распыления естественного оксидного покрытия и поверхностных слоев кремния ионами аргона плотность разорванных связей на кремнии существенно увеличивается. Это повышает реакционную способность поверхностных атомов кремния и способствует активному формированию оксидного покрытия как в процессе распыления атомов кремния за счет кислорода остаточной атмосферы вакуумной камеры, так и после извлечения образцов на атмосферу.

В связи с аморфизацией и интенсивным образованием оксидного покрытия пороги начала автоэмиссии пластин кремния после травления в низкоэнергетичной плазме аргона хотя и уменьшаются за счет уменьшения толщины оксидного покрытия по сравнению с исходными пластинами с естественным оксидным покрытием, но очень не значительно. Несмотря на снижение порогов

автоэмиссии, максимальные плотности токов уменьшаются с  $0.7 \text{ mA/cm}^2$  при автоэмиссии с кремниевых пластин с естественным покрытием до  $0.6 \text{ mA/cm}^2$  после сухого травления в плазме аргона (рис. 3, *b*). Согласно представлениям Фаулера–Нордхейма, это может быть обусловлено геометрическими факторами, связанными со снижением коэффициентов усиления поля  $\beta$  на отдельных эмитирующих выступах и их взаимной экранировкой.

Коэффициент  $\beta$  определяет величину электрического поля на отдельном (усредненном) микровыступе поверхности автокатода и при прочих одинаковых условиях, согласно закону Фаулера–Нордхейма, нелинейным образом определяет величину плотности тока автоэмиссии [6]:

$$j = A \frac{(E_{av}\beta)^2}{\varphi} \exp\left(-\frac{B\varphi^{3/2}}{E_{av}\beta}\right), \quad (7)$$

где  $A, B$  — некоторые коэффициенты,  $\varphi$  — работа выхода электрона из материала,  $E_{av}$  — средняя величина напряженности внешнего электрического поля, которая через коэффициент  $\beta$  определяет напряженность поля на отдельном (усредненном) микровыступе пленочной структуры по формуле

$$E_{mp} = \beta E_{av}. \quad (8)$$

Из электростатического рассмотрения следует, что коэффициент  $\beta$  в первом приближении линейно связан с высотой микровыступов и зависит от их поверхностной плотности (расстояния между выступами). С увеличением последней выше некоторого значения, зависящего от высоты выступов, величина  $\beta$  начинает уменьшаться из-за экранирования внешнего электрического поля соседними выступами. Это снижает напряженность электрического поля на вершинах эмиссионных центров и для возобновления автоэмиссии требует увеличения напряженности внешнего электрического поля. Порог напряженности электрического поля начала автоэмиссии при этом увеличивается. Одновременно с этим, согласно выражению (7), с уменьшением  $\beta$  уменьшается плотность тока автоэмиссии. Эти представления коррелируют с изменением морфологии поверхности кремния после травления в плазме аргона: меньшей высотой эмитирующих выступов и более высокой их поверхностной плотностью по сравнению с поверхностью исходной пластины с естественным оксидным покрытием.

Различие в преобладающих механизмах плазмохимического травления в хладоне-14 при различных знаках потенциалов смещения на подложкодержателе обуславливает различные морфологические характеристики поверхностей кристаллов кремния. При травлении с положительным смещением за счет отсутствия ионного распыления поверхностных атомов кремния и преобладания изотропного электронно-радикального травления с образованием  $\text{SiF}_2$  и  $\text{SiF}_4$ -комплексов высоты выступов рельефа поверхности увеличивается по сравнению с травлением при отрицательном смещении

от 6.4 до 17.2 nm. Одновременно с этим уменьшаются поверхностные плотности выступов от  $2.3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  до  $0.8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  и соответственно увеличивается среднее расстояние между ними от 66 до 112 nm. В соответствии с этим улучшается геометрический фактор поверхности кремния: увеличивается коэффициент усиления поля автоэмиссии на эмитирующих выступах и уменьшается взаимная экранировка выступами внешнего электрического поля. Это способствует уменьшению порогов автоэмиссии и увеличению плотностей автоэмиссионных токов (рис. 3).

### 2.3. Влияние дипольных моментов поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, показывает, что при плазмохимическом травлении кристаллов кремния в среде хладона-14 независимо от знака смещения на подложкодержателе наблюдается практически линейная взаимосвязь между высотами выступов и расстояниями между ними, одной стороны, и порогами напряженностей полей автоэмиссии и максимальными плотностями токов, с другой. Такой характер корреляции порогов автоэмиссии и максимальных плотностей токов через коэффициент усиления поля  $\beta$  не соответствует выражению (7), в котором взаимосвязь между этими параметрами должна описываться не обратно пропорциональной, а экспоненциальной функцией. Причина этого состоит в следующем.

При травлении пластин кремния с естественным оксидным покрытием в плазме хладона-14 с различным знаком смещения на подложкодержателе, образующиеся после травления  $\text{Si-CF}_m$ ,  $\text{Si-F}$  и другие фторосодержащие углеродные и кремниевые комплексы препятствуют возникновению и росту со временем за счет диффузии кислорода диэлектрического потенциального барьера на атомно-чистой поверхности кристаллов кремния в виде оксидов различного стехиометрического состава. Однако их образование, так же как любой другой химический адсорбат, изменяет работу выхода электронов за счет изменения дипольного момента поверхности [7].

Из-за высокой электроотрицательности фтора увеличение дипольного момента особенно сильно в случае присутствия на поверхности кремния  $\text{Si-F}$ -комплексов, которое реализуется при травлении в плазме хладона-14 с положительным смещением на подложкодержателе. Для перемещения электрона через образовавшийся дипольный слой необходимо совершить дополнительную работу. Это приводит к росту работы выхода по сравнению с атомно-чистой поверхностью кремния и отсутствию нелинейной взаимосвязи между коэффициентом усиления поля и плотностью автоэмиссионного тока. Благодаря отсутствию диэлектрического барьера в виде оксидов кремния с одновременным улучшением геометрического фактора автоэмиссионной поверхности

и обогащением поверхностных состояний электронами в результате нейтрализации заряда донорных центров поверхностных атомов кремния с ненасыщенными химическими связями максимальная плотность автоэмиссионного тока увеличивается по сравнению с кремнием с естественным оксидным покрытием от 0.7 до 5.7 mA/cm<sup>2</sup>, а порог автоэмиссии уменьшается более чем в 2 раза.

При отрицательных смещениях на подложкодержателе в условиях ограниченного поступления на поверхность кремния отрицательных ионов фтора и электронов преобладающими являются  $\equiv\text{Si}-\text{CF}_m\equiv$ , а также  $\equiv\text{Si}-\text{C}=\text{CF}_m$ -комплексы, которые на границе с кремнием образуют монослой карбида кремния с фторуглеродной диэлектрической поверхностной фазой. Он препятствует проникновению электрического поля в полупроводник, с одной стороны, и препятствует выходу носителей из подложки, с другой. Величина барьера зависит от толщины диэлектрического слоя. В результате этого автоэмиссия с поверхности, так же, как в случае с естественным оксидным покрытием, будет осуществляться за счет двуступенчатого туннелирования электронов из зоны проводимости кремния через карбид-кремниевый диэлектрический барьер во фторуглеродную поверхностную фазу и затем в вакуум. Вероятность такого туннелирования существенно ниже, чем в случае образования монослойных Si-F-комплексов при травлении кремния в хладоне-14 с положительным смещением (см. таблицу). Кроме того, носители, инжектированные из кремниевой подложки в Si-CF<sub>m</sub>-поверхностный слой, взаимодействуют с дефектами, расположенными в его объеме. Результатом этого взаимодействия является захват носителей на ловушечные центры, который приводит к дополнительному увеличению порога автоэмиссии. Пороги начала автоэмиссии при травлении кремния в плазме хладона-14 с отрицательным смещением увеличиваются по сравнению с плазмохимическим травлением в том же составе рабочего газа при положительном смещении до 75 V/μm, а максимальные плотности токов уменьшаются до 2.4 mA/cm<sup>2</sup>.

## Заключение

Низкоэнергетичная СВЧ плазменная микрообработка в зависимости от режима воздействия и состава рабочего газа позволяет различным образом модифицировать („перестраивать“) наноморфологию гетероструктурной поверхности пластин кремния (100) с естественным оксидным покрытием и ее автоэмиссионные свойства. Пороги начала автоэмиссии и максимальные плотности автоэмиссионных токов решеток эмиттеров на пластинах кремния *n*-типа, кроме традиционной зависимости от коэффициента усиления поля на эмитирующих выступах, определяются также составом, толщиной и суммарным дипольным моментом образующейся после процесса травления поверхностной фазы. Использо-

ванием режимов плазмохимического травления с монослойным фторированием образующейся атомно-чистой поверхности пластин кремния и насыщением ее поверхностных уровней электронами плазмы позволяет стабилизировать состав поверхностной фазы, уменьшить пороги начала автоэмиссии и увеличить максимальные плотности автоэмиссионных токов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

## Список литературы

- [1] *Velásquez-García L.F., Guerrero S., Niu Y., Akinwande A.I.* // IEEE Trans. Electron Dev. (2011). Vol. 58. P. 1783.
- [2] *Гуляев Ю.В., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Морев С.П., Резчиков А.Ф., Симицын Н.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 11. С. 63–70.
- [3] *Яфаров Р.К.* Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
- [4] *Ивановский Г.Ф., Петров В.И.* Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
- [5] *Яфаров Р.К.* // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 3. С. 329–335.
- [6] *Усанов Д.А., Яфаров Р.К.* Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода. Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2011. 126 с.
- [7] *Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М.* Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.