

УДК 621.315.592

## Использование атомной структуры кристаллов кремния для получения многоострийных полевых источников электронов

© Р.К. Яфаров

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 410019 Саратов, Россия

E-mail: pirpc@yandex.ru

(Получена 3 марта 2017 г. Принята к печати 20 марта 2017 г.)

Исследованы автоэмиссионные характеристики полевых источников электронов, полученных с использованием атомной структуры кристаллов кремния, процессов гетерофазной вакуумно-плазменной самоорганизации островковых углеродных покрытий и высокоанизотропного плазмохимического травления в условиях слабой адсорбции. Установлена взаимосвязь морфологических и автоэмиссионных характеристик автокатодных микроструктур на кристаллах кремния различных типов проводимости. Результаты экспериментальных исследований интерпретированы с использованием представлений Фаулера–Нордгейма во взаимосвязи с изменениями составов поверхностных фаз в процессах получения эмиттирующих кремниевых выступов.

DOI: 10.21883/FTP.2018.02.45435.8571

### 1. Введение

Исследования процессов протекания тока в полупроводниках в сильных электрических полях ( $10^6$ – $10^7$ ) В/см и, в частности, туннельной эмиссии электронов из полупроводников при создании полевых источников электронов приобретают в последние годы высокую практическую значимость. Традиционно исследования проводились для полупроводников *n*-типа, где электроны являются основными носителями, имеют высокую концентрацию в зоне проводимости, из которой и осуществляется автоэмиссия. В связи с разработкой новых типов быстродействующих приборов для микро- и нанoeлектроники, а также различных оптоэлектронных устройств в настоящее время наметилась устойчивая тенденция к использованию полевой эмиссии электронов и из полупроводников с дырочным типом проводимости. Большой интерес вызывают, например, исследования, направленные на создание фотопольевых детекторов со сверхвысокой квантовой эффективностью, которые могут работать в инфракрасной области спектра, а также вакуумных транзисторов и светодиодов, которые по теоретическим оценкам могут работать на терагерцовых частотах [1,2]. При этом наиболее перспективным материалом для полевых источников электронов является кристаллический кремний. В первую очередь это обусловлено развитой технологической базой кремниевой микроэлектроники, обеспечивающей создание на кристаллах кремния высокоаспектных микроструктур с высокой поверхностной плотностью, а также обнаруженными люминесцентными свойствами нанокристаллического кремния, которые позволяют надеяться на создание в будущем сверхбыстродействующих радиационно стойких кремниевых интегральных схем с оптической связью [3].

Недостатками полевых источников электронов на основе кремния являются высокая чувствительность к состоянию поверхности и низкие плотности автоэмиссион-

ных токов, которые, как правило, находятся в интервале 50–150 мкА/см<sup>2</sup>. Так, в работе [4] 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  $J = 145$  мкА/см<sup>2</sup> при напряженности поля анода  $E = 32$  В/мкм. Такие плотности токов удовлетворяют требованиям использования чисто кремниевых автоэмиссионных катодов в области FED (field emission displays — дисплеи с полевыми эмиттерами) [5]. Однако этого не достаточно для создания, например, вакуумных полевых транзисторов с высокой выходной мощностью.

Так как автоэлектронная эмиссия осуществляется с эмиссионных выступов, где реализуется наибольшая напряженность электрического поля и выделяется максимальная мощность, очевидным для повышения деградационной стойкости автокатодов является необходимость снижения токовой нагрузки на каждый из них. Максимальное значение такой нагрузки зависит от свойств используемого многоострийного эмиттерного материала. Для острийных кремниевых автокатодов при максимальной плотности тока 150 мкА/см<sup>2</sup> и типичном расстоянии между остриями 3–4 мкм [6] поверхностная плотность эмиттирующих выступов находится в интервале  $(6–9) \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup>. Очевидно, что для снижения токовой нагрузки на каждый эмиттирующий выступ и(или) увеличения максимальной плотности тока при той же токовой нагрузке на острие необходимо увеличивать поверхностную плотность эмиссионных центров.

При поверхностной плотности острий  $(10^7–10^9)$  см<sup>-2</sup> период их расположения должен быть меньше 1 мкм. С использованием современных литографических микроэлектронных технологий создание таких многоострийных матриц представляется вполне реализуемой задачей. Однако это приведет к неоправданному их удорожанию. Решение этой проблемы, как и в случае разработки промышленных технологий получения квантовых точек [7],

может быть достигнуто разработкой новых технологий создания многострйных кремниевых катодных материалов с использованием явлений самоорганизации.

Цель работы — исследование влияния нелитографического наноструктурирования поверхности кристаллов кремния различных типов проводимости на автоэмиссионные характеристики полевых источников электронов, изготовленных на их основе.

## 2. Методика и результаты экспериментов

Эксперименты, связанные с нелитографическим наноструктурированием поверхности кристаллов кремния при получении эмиссионных выступов многоострйных полевых источников электронов с повышенной поверхностной плотностью, проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2.45 ГГц [8]. В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния Si (100) различных типов проводимости с удельным сопротивлением 0.01–0.02 Ом·см. Наноструктурирование поверхностей осуществлялось с использованием гетерофазной вакуумно-плазменной самоорганизации и атомной структуры кристаллов кремния (100) в качестве подложки [9]. Процесс осуществлялся в одном технологическом цикле и включал в себя следующие операции: плазменное травление для получения атомно-чистых поверхностей пластин кремния, последующее осаждение на них субнаноразмерных углеродных масочных покрытий и затем высокоанизотропное травление для получения на поверхности наноразмерных столбчатых кремниевых выступов. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. В качестве рабочего газа для плазменного удаления естественного оксидного покрытия на кремнии использовался аргон. Давление газа в процессе сухого травления было равным 0.1 Па и обеспечивало выполнение условий электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. Смещение в процессах удаления защитных окисных покрытий составляло –100 В. Глубина стравленного слоя составляла около 100 нм.

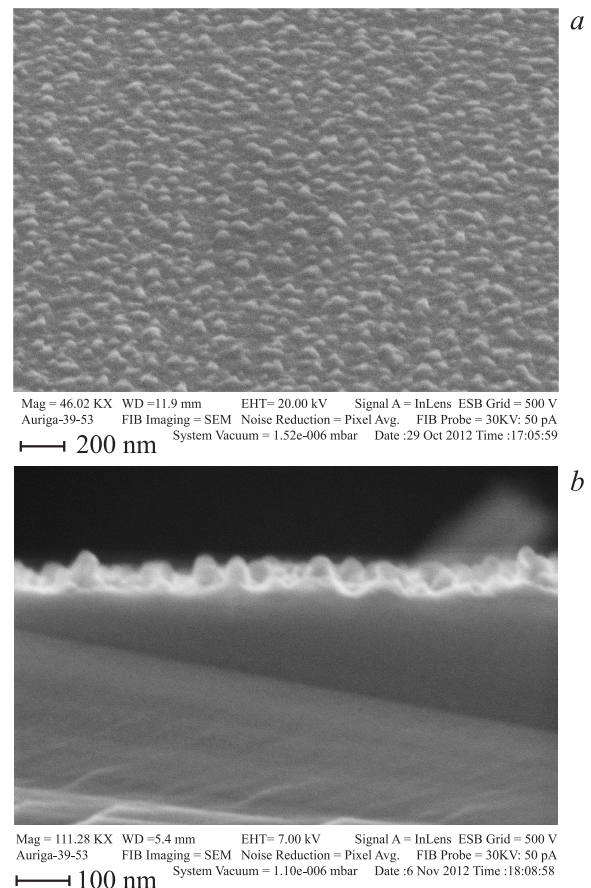
Осаждение углеродных покрытий осуществлялось в СВЧ плазме с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола. Процесс осуществлялся в условиях малой адсорбции при температуре подложки 250°C и давлении паров этанола около 0.05 Па. Потенциал смещения ( $U_{bi}$ ) на подложкодержателе в процессе осаждения углеродного покрытия был равен –100 В. Длительность осаждения составляла 6 и 7 с. При этих длительностях осаждения толщины островковых углеродных покрытий имеют наибольшую величину и позволяют получать в процессе высокоанизотропного плазмохимического травления кремния (100) столбчатые наносистемы с максимальной высотой [9]. Высокоанизотропное травление матрицы кремния осуществлялось

при положительном смещении на подложкодержателе с использованием хладона-14 при давлении менее 0.1 Па.

Наноморфология наноструктурированных поверхностей кристаллов кремния изучалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) P4-SPM-MDT. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0.1 Н/м. Поле сканирования составляло  $3 \times 3$  мкм. С использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Auriga измерялись латеральные размеры островковых образований и высота кремниевых выступов после плазмохимического травления на сколе пластин. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения микроскопа.

Исследования автоэмиссионных свойств осуществлялись в условиях высокого вакуума ( $10^{-5}$  Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Диаметр рабочей поверхности анода, изготовленного из углеродного материала МПГ-6, составлял 3 мм.

На рис. 1 приведены СЭМ-изображения кремниевых нановыступов, полученных после высокоанизотропного



**Рис. 1.** СЭМ-изображения пространственных наноструктур после травления пластин кремния в хладоне-14 с использованием самоорганизованных углеродных масочных покрытий: *a* — вид под углом 63°, *b* — изображение на сколе пластины.

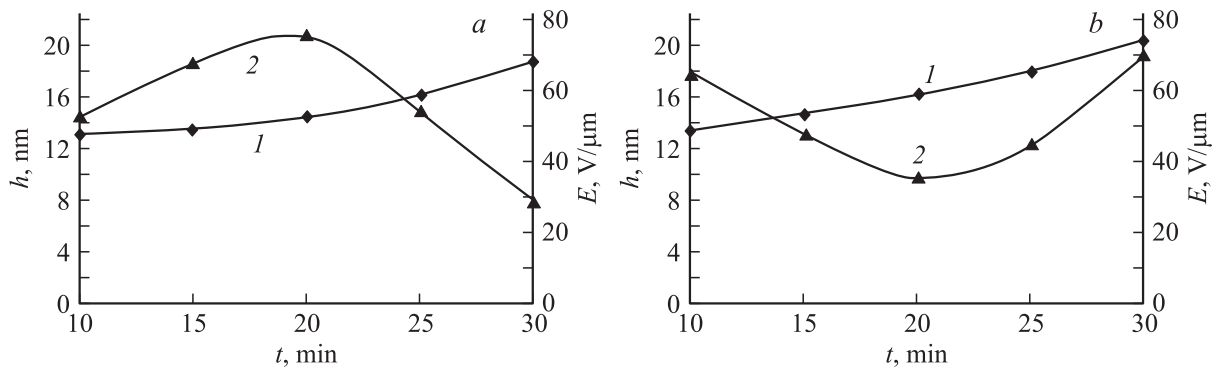


Рис. 2. Зависимости высот выступов (1) и порогов возбуждения автоэмиссии (2) от длительности масочного травления пластин кремния (100) *n*- (а) и *p*-типов (b) в плазме хладона-14.

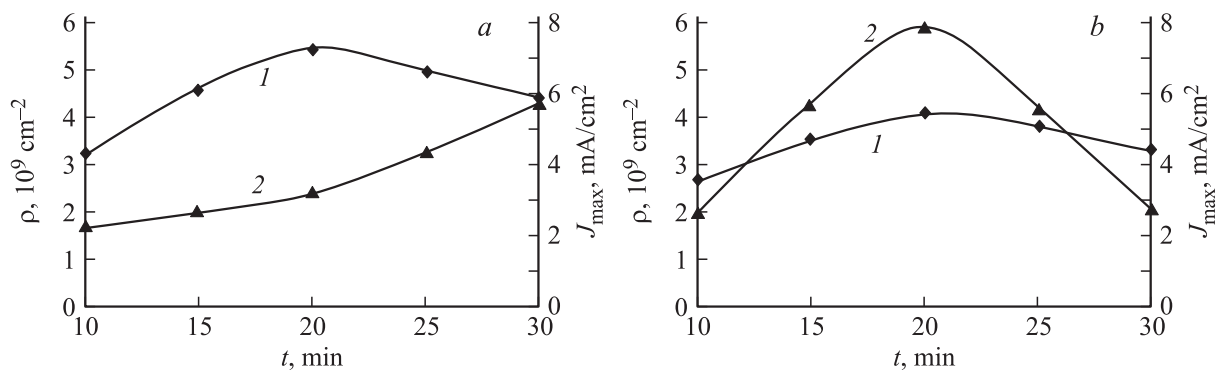


Рис. 3. Зависимости поверхностных плотностей выступов (1) и плотностей максимальных токов автоэмиссии (2) от длительности масочного травления кремния (100) *n*- (а) и *p*-типов (b) в плазме хладона-14.

СВЧ плазмохимического травления в хладоне-14 в течение 30 мин пластин кремния с самоорганизованным углеродным масочным покрытием, осажденным при длительности 7 с. Глубина травления пластин кремния через островковое покрытие достигало 50 нм при диаметре выступов до 20–30 нм.

На рис. 2, 3 приведены зависимости параметров наноморфологий и автоэмиссионных характеристик от длительностей высокоанизотропного плазмохимического травления пластин кремния *n*- и *p*-типов проводимости в атмосфере хладона-14. Видно, что характер зависимостей морфологических параметров структурированных поверхностей кристаллов кремния различных типов проводимостей от длительностей масочного травления практически одинаков. В обоих случаях с увеличением длительностей плазмохимического травления в интервале от 10 до 30 мин высоты выступов увеличиваются, а поверхностные плотности выступов имеют максимумы при одинаковых длительностях травления равных 20 мин. В случае кремния *n*-типа они немного больше. Поверхностные плотности находятся на уровне  $(3-5) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  (рис. 3). Это на 2–3 порядка больше, чем при получении кремниевых эмиттирующих центров с использованием традиционных литографических технологий [5,6,10]. В отличие от морфологических, характер изменения автоэмиссионных характери-

стик полученных многоострийных катодных матриц от длительностей масочного травления зависит от типа электропроводности полупроводника.

Детальное изучение полученных экспериментальных зависимостей показывает, что для кристаллов кремния *n*-типа с увеличением длительностей травления через островковую углеродную маску высоты кремниевых выступов увеличиваются с небольшим ускорением от 13 нм при длительности травления 10 мин до 19 нм при 30 мин (рис. 2, а). Наибольший прирост высот выступов наблюдается при длительностях травления в интервале от 20 до 30 мин. В этом же интервале длительностей наблюдается резкое уменьшение напряженности поля возбуждения автоэмиссии от 55–75 В/мкм при длительностях травления 10 и 20 мин до 28 В/мкм при 30 мин, когда высоты выступов имеют наибольшие значения. Максимальные плотности автоэмиссионных токов в полученных автоэмиссионных структурах при длительностях травления больше 20 мин не уменьшаются, как поверхностные плотности выступов, а достаточно резко возрастают. По сравнению с интервалом от 10 до 20 мин, их увеличение происходит более чем в 3 раза (рис. 3, а).

Для кристаллов кремния *p*-типа с увеличением длительностей травления высоты кремниевых выступов линейно увеличиваются от 13.5 нм при длительности травления 10 мин до 20 нм при 30 мин. Напряженности

поля возбуждения автоэмиссии имеют минимум при длительности травления 20 мин. При этой же длительности реализуются максимальные значения поверхностных плотностей выступов и плотностей автоэмиссионных токов. При больших длительностях травления пороги начала автоэмиссии увеличиваются, а максимальные плотности автоэмиссионных токов уменьшаются. Это происходит несмотря на то, что высоты выступов и следовательно коэффициенты усиления поля на них продолжают увеличиваться. Поверхностные плотности в интервале длительностей травления от 10 до 30 мин изменяются незначительно (от 2.8 до  $3.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ). В отличие от этого, изменение плотностей токов происходит более чем в 3 раза: от 2.6 до  $8 \text{ мА/см}^2$ .

### 3. Обсуждение результатов

Согласно представлениям о механизме автоэлектронной эмиссии, базирующимся на теории Фаулера–Нордгейма, уменьшение порога возбуждения автоэмиссии при увеличении высот эмиттирующих выступов, которое наблюдается для пластин кремния *n*-типа в интервале длительностей масочного травления от 20 до 30 мин (рис. 2), а для пластин кремния *p*-типа в интервале от 10 до 20 мин обусловлено увеличением коэффициента усиления поля  $\beta$  на их вершинах. Это обеспечивает улучшение прозрачности потенциальных барьеров для туннелирующих электронов, которое, кроме уменьшения порогов возбуждения автоэмиссии, выражается в ускоренном росте максимальных плотностей автоэмиссионных токов (рис. 3). Для пластин кремния *n*-типа рост плотностей токов происходит при некотором уменьшении поверхностной плотности эмиттирующих выступов. Это может быть связано с уменьшением взаимной экранировки внешнего электрического поля эмиттирующими выступами при увеличении расстояния между ними. Так же как и в случае увеличения высоты выступов, это способствует увеличению прозрачности туннельных барьеров при автоэмиссии.

Для пластин кремния *n*-типа при увеличении длительностей масочного травления в интервале от 10 до 20 мин незначительное ( $0.5 \text{ мА/см}^2$ ) увеличение максимальных плотностей токов происходило с одновременным увеличением высоты (коэффициента  $\beta$ ), поверхностной плотности выступов и порога возбуждения автоэмиссии. Для пластин кремния *p*-типа в интервале длительностей от 20 до 30 мин также наблюдается одновременное увеличение высоты выступов и порогов возбуждения автоэмиссии. При этом максимальные плотности токов быстро уменьшаются. Подобные закономерности в изменении морфологических и автоэмиссионных свойств кристаллов кремния противоречат теоретическим представлениям Фаулера и Нордгейма.

Как показано в работе [11], формирование углеродных масочных покрытий на атомно-чистых поверхностях кристаллов кремния в виде наноразмерных островков-доменов осуществляется в процессе микроволнового

плазмохимического осаждения из паров этанола по механизму прекурсорной хемосорбции. В основании доменов находится монослой карбида кремния. На нем формируется слой аморфного углерода, выполняющего роль маскирующего покрытия при последующем высокоанизотропном травлении пластин кремния. Из-за различного сродства к электрону атомов кремния и углерода карбид-кремниевые кластеры в доменах образуются в виде диполей. Непосредственно на границе кремния они ориентированы перпендикулярно к поверхности раздела, придавая поверхности некоторый суммарный дипольный момент [12]. С увеличением толщины слоя разориентация диполей увеличивается, а суммарный дипольный момент поверхности уменьшается [12,13].

Высокоанизотропное травление с использованием островкового углеродного масочного покрытия проводится в среде хладона-14 в условиях слабой адсорбции при положительном смещении на подложкодержателе. В этом случае за счет интенсивной электронной бомбардировки реализуются гетерогенные процессы диссоциации и активации атомов  $\text{CF}_4$  с образованием атомарного фтора, который при взаимодействии с незащищенными островками углерода поверхностными атомами кремния образует летучие продукты реакции и вызывает его травление [8,14]. Скорости травления кремния лимитируются количеством образующегося на поверхности атомарного фтора, которое в свою очередь определяется энергией, передаваемой бомбардирующими электронами фторуглеродным адатомам. При травлении кремния *n*-типа энергия, передаваемая адатомам бомбардирующими поверхность кремния электронами за счет кулоновского взаимодействия с основными носителями подложки меньше, чем при травлении пластин кремния *p*-типа. Следствием этого является то, что скорость электронно-плазменного травления пластин кремния *p*-типа относительно одинаковой по фазовому составу углеродной маски выше, чем при травлении пластин *n*-типа. Так, для длительностей травления 30 мин высота выступов на кремнии *p*-типа составляет 20 нм, тогда как на кремнии *n*-типа она не превышает 18 нм (рис. 2).

При получении атомно-чистой поверхности пластин кремния ионно-плазменным травлением в среде аргона одновременно с удалением естественного оксидного покрытия происходит аморфизация приповерхностного слоя и формирование на ней различных кремниевых оксид-нитридных мелкокристаллических наночастиц [8,14]. Их образование происходит в результате взаимодействия поверхностных атомов кремния с оборванными связями с ионами и радикалами кислорода и азота остаточной атмосферы вакуумной камеры. Последующее плазмохимическое осаждение субмонослойного углеродного покрытия приводит к частичному восстановлению оксинитридного кремниевых покрытия и формированию углеродной островковой масочной структуры, в основании которой находятся вышеназванные дипольные Si–C кластеры.

Формирование оксид-нитридной диэлектрической прослойки на атомно-чистой поверхности кремния приво-

дит к увеличению потенциального барьера и порога возбуждения автоэмиссии. Величина барьера зависит от толщины диэлектрического слоя. Он препятствует проникновению электрического поля в полупроводник, с одной стороны, и выходу носителей из подложки, с другой. В результате этого автоэмиссия с кремниевых выступов осуществляется за счет двухступенчатого туннелирования электронов из зоны проводимости кремния через аморфный карбид-кремниевый диэлектрический барьер в углеродную поверхностную фазу и затем в вакуум. Вероятность такого туннелирования существенно снижается. Кроме того, носители, инжектированные из кремниевой подложки в диэлектрический поверхностный слой, взаимодействуют с дефектами, расположенными в его объеме. Результатом этого является захват носителей на ловушечные центры, который приводит к дополнительному увеличению порога автоэмиссии.

Для пластин кремния *n*-типа в интервале длительностей масочного травления от 10 до 20 мин постепенное уменьшение толщины островкового углеродного покрытия и затем кремний-углеродного и оксид-нитридного диэлектрического слоя, которое происходит за счет конечной селективности травления гетероструктуры углеродосодержащая маска и кремний, приводит к уменьшению величины диэлектрического барьера поверхностной фазы выступов. Это приводит к небольшому повышению вероятности туннелирования электронов и увеличению максимального автоэмиссионного тока (рис. 3, *a*). Однако одновременно с этим и небольшим увеличением высоты выступов и, следовательно, коэффициента  $\beta$  происходит также небольшое увеличение порога возбуждения автоэмиссии (рис. 2, *a*). Это противоречие с представлениями Фаулера–Нордгейма может быть связано с накоплением отрицательного заряда в островковом масочном покрытии в процессе травления, который увеличивает работу выхода и блокирует, таким образом, начало автоэмиссионного процесса.

В интервале длительностей масочного травления от 20 до 30 мин увеличение скорости роста высоты выступов, уменьшение порогов возбуждения автоэмиссии и ускоренный рост максимальных плотностей автоэмиссионных токов (рис. 2, 3), так же как в предыдущем интервале, обусловлены уменьшением толщины и изменением состава поверхностной фазы кремниевых выступов. Благодаря обогащению оставшегося масочного покрытия карбид-кремниевыми кластерами, селективность травления которых по отношению к кремнию выше, чем селективность травления углерода к кремнию, скорость травления материала маски уменьшается. При неизменной скорости травления кремниевой матрицы это увеличивает прирост высот кремниевых выступов за одинаковый интервал длительностей масочного травления (рис. 2, *a*).

Уменьшение толщины покрытия приводит к увеличению суммарного дипольного момента оставшейся поверхностной фазы и уменьшению величины потенциального барьера для туннелирования электронов. По-

ложительный заряд диполей на поверхности полупроводника *n*-типа уменьшает работу выхода электронов. Суммарным результатом этого является уменьшение порогов возбуждения автоэмиссии до 28 В/мкм и достаточно сильное увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов, которые достигают 5.7 мА/см<sup>2</sup>. При заданном режиме масочного травления этот результат для кристаллов кремния *n*-типа достигается при длительностях около 30 мин. Среднее расстояние между выступами высотой около 18 нм при этом составляет 133 нм.

Для пластин кремния *p*-типа, скорость плазмохимического травления которого в плазме хладона-14 при положительном смещении на подложкодержателе выше, чем для кремния *n*-типа, уменьшение толщины островкового углеродного и кремниевого оксид-нитридного диэлектрического слоя в интервале длительностей масочного травления от 10 до 20 мин, одновременно с увеличением высоты выступов и коэффициента  $\beta$  (рис. 2, *b*), приводит, как и для пластин кремния *n*-типа, к уменьшению величины диэлектрического барьера поверхностной фазы выступов. Это сопровождается уменьшением порогов возбуждения автоэмиссии и достаточно сильным увеличением плотностей автоэмиссионных токов (рис. 3, *b*), так как, согласно выражению Фаулера–Нордгейма, взаимосвязь между коэффициентом усиления поля за счет роста высоты выступов и плотностью автоэмиссионного тока описывается экспоненциальной функцией.

При длительностях масочного травления более 20 мин изменения в характерах взаимосвязей морфологических и автоэмиссионных характеристик обусловлены обогащением оставшегося масочного покрытия карбид-кремниевыми диполями, ориентированными перпендикулярно к поверхности кремния. Увеличение положительного суммарного дипольного момента оставшейся поверхностной фазы кремниевых выступов приводит к обеднению приповерхностного слоя основными носителями. Это уменьшает, по сравнению с объемом, его проводимость и вызывает необходимость увеличения при автоэмиссии внешнего электрического поля, которое приводит с увеличением длительностей масочного травления к более быстрому разрушению эмиттирующей структуры.

Аспектное отношение многоострийных автокатодов, полученных с использованием атомной структуры кристаллов кремния, определяли обработкой их АСМ изображений с помощью функции Threshold программного обеспечения Image Analysis 2.2. Обработка заключалась в определении параметров морфологии поверхностей после проведения секущей плоскости параллельно основанию скана таким образом, чтобы ее положение соответствовало максимальному числу выступов на поверхности. Сечение позволяет определить высоту кремниевых выступов ( $h$ ), превышающих положение секущей плоскости, а также их латеральный размер ( $L$ ) на уровне секущей плоскости [15].

Для пластин кремния *n*-типа с удаленным в плазме аргона естественным оксидным покрытием оптимальное

значение аспектного отношения, которое рассчитывается как отношение  $h$  к  $L$  и реализуется при длительности высокоанизотропного травления матрицы через островковую углеродную маску 30 мин, составило 0.04. Для многоострижных автокатодов ему соответствует значение порога возбуждения автоэмиссии 28 В/мкм при плотности максимального автоэмиссионного тока 5.7 мА/см<sup>2</sup>. При этом максимальные плотности автоэмиссионных токов увеличиваются, по сравнению с неструктурированным кремнием, более чем на порядок.

Для пластин кремния  $p$ -типа оптимальное значение аспектного отношения, которое реализуется при длительности высокоанизотропного травления 20 мин, равно 0.033. Ему соответствуют минимальное значение порога возбуждения автоэмиссии, которое для многоострижных автокатодов на основе кристаллов кремния  $p$ -типа составляет 32 В/мкм, и плотность максимального автоэмиссионного тока около 8 мА/см<sup>2</sup>. Среднее расстояние между выступами высотой около 16 нм составляет 160 нм. При этом увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов по сравнению с неструктурированным кремнием  $p$ -типа составляет около двух порядков.

#### 4. Заключение

Повышение плотности автоэмиссионных токов и(или) деградационной стойкости многоострижных полевых источников электронов на основе кристаллов кремния различных типов проводимости может быть реализовано увеличением поверхностной плотности эмиссионных центров за счет снижения токовой нагрузки на каждый из них. Существенное увеличение поверхностной плотности центров достигается нелитографическим наноструктурированием с использованием атомной структуры кристаллов кремния, процессов гетерофазной вакуумно-плазменной самоорганизации островковых углеродных покрытий и высокоанизотропного плазмохимического травления в условиях слабой адсорбции.

Характер зависимостей морфологических параметров кристаллов кремния различных типов проводимостей от длительностей масочного высокоанизотропного травления практически одинаков. Поверхностные плотности эмиссионных центров находятся на уровне  $(3-5) \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>. Это на 2–3 порядка больше, чем при получении эмиттерных решеток на кристаллах кремния с использованием микроэлектронных литографических технологий.

В отличие от морфологических, характер изменения автоэмиссионных характеристик полученных многоострижных катодных матриц от длительностей масочного травления зависит от типа электропроводности полупроводника. Для кристаллов кремния  $n$ -типа получены плотности автоэмиссионных токов до 5.7 мА/см<sup>2</sup> при пороге начала автоэмиссии 28 В/мкм. Среднее расстояние между выступами высотой около 18 нм составляет

133 нм при оптимальной длительности высокоанизотропного микроволнового плазмохимического травления с использованием самоорганизованных островковых масочных покрытий 30 мин. Для кристаллов кремния  $p$ -типа минимум напряженности поля возбуждения автоэмиссии, равный 32 В/мкм, достигается при длительности масочного травления 20 мин. Получены плотности автоэмиссионных токов до 8 мА/см<sup>2</sup> при среднем расстоянии между выступами высотой 16 нм около 160 нм.

Взаимосвязь морфологических и автоэмиссионных характеристик автокатодных микроструктур на кристаллах кремния может быть интерпретирована с использованием представлений Фаулера–Нордгейма во взаимосвязи с изменениями составов поверхностных фаз при получении эмиттирующих кремниевых центров.

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

#### Список литературы

- [1] Ю.В. Гуляев, Н.П. Абанышин, Б.И. Горфинкель, С.П. Морев, А.Ф. Резчиков, Н.И. Сеницын, А.Н. Якунин. Письма ЖТФ, **39** (11), 63 (2013).
- [2] Jin-Woo Han, Jae Sub Oh, M. Meeyappan. Appl. Phys. Lett., **100**, 213505 (2012).
- [3] Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. *Кремний — материал нанoeлектроники* (М., Техносфера, 2007).
- [4] L.F. Velázquez-García, S. Guerrero, Y. Niu, A.I. Akinwande. IEEE Trans. Electron Dev., **58**, 1783 (2011).
- [5] Fei Zhao, Jian-hua Deng, Dan-dan Zhao, Ke-fan Chen, Guo-an Cheng, Rui-ting Zheng. J. Nanosci. and Nanotechn., **10**, 7634 (2010).
- [6] K. Betsui. In: Technical Digest of International Vacuum Microelectronics Conf. (Nagahama, Japan, 1991) p. 26–29.
- [7] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. ФТП, **32** (4), 385 (1998).
- [8] Р.К. Яфаров. *Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий* (М., Физматлит, 2009).
- [9] Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин. ФТП, **51** (4), 558 (2017).
- [10] Е.И. Гиваргизов, В.В. Жирнов, А.Н. Степанова, Л.Н. Обеленская. Патент RU № 2074444.
- [11] Р.К. Яфаров. ФТП, **49** (3), 329 (2015).
- [12] К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. *Введение в физику поверхности* (М., Наука, 2006).
- [13] *Технология СБИС*. В 2-х кн. Пер. с англ. под ред. С. Зи (М., Мир, 1985).
- [14] Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. *Ионно-плазменная обработка материалов* (М., Радио и связь, 1986).
- [15] Д.В. Нефедов, В.Я. Шаныгин, С.Ю. Суздальцев, Р.К. Яфаров. *Матер. Международ. науч.-техн. конф. „Актуальные проблемы электронного приборостроения“* (Саратов, Россия, 2016) т. 2, с. 469.

Редактор Г.А. Оганесян

## The application of the atomic structure of silicon crystals to obtain the multi-peaks field electron sources

*R.K. Yafarov*

Saratov branch of the Institute  
of Russian Academy of Sciences Kotel'nikov Institute  
of Radio Engineering and Electronics,  
410019 Saratov, Russia

**Abstract** Self-emission properties of field sources of electrons were investigated. These field sources were obtained by using the atomic structure of silicon crystals, heterophase processes of the vacuum and plasma self-organization of the islet carbon coatings and high anisotropic plasma-chemical etching in the conditions of weak adsorption. The correlation of the morphologic and field emission characteristics of the auto cathode microstructures on silicon crystals of different types of conductivity was ascertained. The results of experimental studies were interpreted by using the ideas of Fowler–Nordheim in connection with changes in the compositions of the surface phases in the processes of emitting silicon peaks obtaining.