

13.2

Автоэмиссия многоострижных катодных матриц на кремнии *p*-типа в сильных импульсных электрических полях

© Р.К. Яфаров

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

Поступило в Редакцию 31 января 2019 г.

В окончательной редакции 31 января 2019 г.

Принято к публикации 5 февраля 2019 г.

Экспериментально исследованы динамические свойства автоэлектронной эмиссии в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности для многоострижных катодных матриц, изготовленных на основе поверхностно модифицированных кристаллов кремния дырочного типа. Показано, что уменьшение порогов начала автоэмиссии с увеличением длительности импульсов увеличивает прозрачность потенциальных барьеров за счет увеличения энергии электронов. Параметры автоэмиссии определяются дипольными моментами поверхностей и встроенными поверхностными потенциалами, которые формируются при плазменном травлении кремния в различных химически активных средах.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.09.47702.17721

Развитие вакуумной микроэлектроники в настоящее время во многом определяется возможностями увеличения частотного диапазона работы полевых источников электронов, используемых при создании активной элементной базы, и снижением времени готовности, которое характеризуется длительностью выхода параметров автоэмиссии на стационарный режим функционирования. Одним из наиболее привлекательных материалов для полевых источников электронов вакуумной микроэлектроники остается кристаллический кремний [1,2]. 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 [3,4].

Целью настоящей работы является исследование эмиссионной способности в сильных импульсных электрических полях наноструктурированных кремниевых катодных матриц, модифицированных с использованием плазмохимической обработки в различных химически активных средах.

Получение поверхностно наноструктурированных кремниевых катодных матриц проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника, описанного в работе [5]. Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда электронно-циклотронного резонанса, составляли 250 W и 875 G соответственно. Давление рабочих газов в процессе плазменной обработки было равно 0.1 Pa и обеспечивало выполнение условий электронно-циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла ~ 5% [5]. В качестве рабочих газов для травления пластин кремния, пассивированных тонкой пленкой естественного окисла, использовались хладон-14 и

аргон. Величины ускоряющих напряжений в процессах плазменного травления были фиксированными и составляли –100 V. Исследовались автоэмиссионные свойства кристаллов кремния КДБ (0.01–0.02) ориентации (100). Процесс их поверхностного наноструктурирования осуществлялся в одном технологическом цикле по методике, изложенной в работах [6,7]. Поверхностная плотность и высота острий наноструктурированных поверхностей кристаллов кремния составляли соответственно $\rho \approx (3-5) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ и $h \approx 7-10 \text{ nm}$. Исследования автоэмиссионных свойств проводились в условиях высокого вакуума (10^{-5} Pa) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 μm . Расстояние между анодом и катодной структурой 20 μm . Диаметр рабочей поверхности анода, изготовленного из углеродного материала МПГ-6, составлял 3 mm. Исследовано влияние длительности импульсов (10, 30, 50 μs) и амплитуды напряжений (от 10 V до 3.5 kV) при различных частотах повторения импульсов на порог начала автоэмиссии, автоэмиссионные токи и длительности установления стационарных режимов при импульсном воздействии сильных электрических полей. Пороги начала автоэмиссии определялись по напряженности электрического поля, при которой токи автоэмиссии составляли 5 μA . Длительность импульсных воздействий составляла 5 и 10 min.

На рис. 1–3 приведены зависимости порогов и токов автоэмиссии от длительности импульсов анодных напряжений, а также амплитуд автоэмиссионных токов от количества импульсов анодных напряжений различной длительности при напряженности поля, превышающей порог автоэмиссии на 10 V/ μm , для кристаллов кремния с плазменной обработкой в различных химически активных средах. Из экспериментальных данных следует, что при плазменной обработке в среде аргона с увеличением длительностей импульсов пороги начала авто-

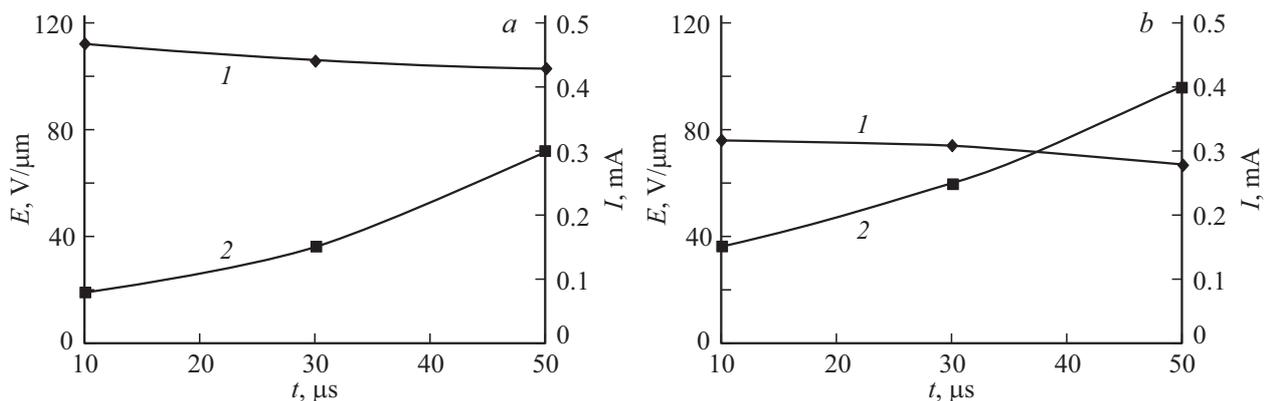


Рис. 1. Зависимости порогов (I) и токов автоэмиссии (2) при напряженности поля, превышающей порог автоэмиссии на $10 \text{ V}/\mu\text{m}$, от длительности импульсов анодных напряжений для кристаллов кремния с плазменной обработкой в различных химических активных средах. a — Ar, b — CF_4 .

эмиссии монотонно уменьшаются от 112 до $103 \text{ V}/\mu\text{m}$ с одновременным увеличением автоэмиссионных токов от 0.1 до 0.3 mA (рис. 1, a). При длительных импульсных воздействиях анодных напряжений амплитуды автоэмиссионных токов практически мгновенно выходят на стационарный уровень для всех длительностей импульсов (рис. 2).

Для кристаллов, обработанных в плазме CF_4 , характеры изменения порогов начала автоэмиссии и автоэмиссионных токов в зависимости от длительностей импульсов такие же, как при обработке в плазме аргона (рис. 1, b). Однако при обработке в плазме хладона-14 пороги автоэмиссии значительно меньше, а токи выше. При долговременных испытаниях с короткими длительностями импульсов наблюдается небольшое уменьшение огибающих амплитуд анодных импульсов. При длительностях импульсов более $30 \mu\text{s}$ амплитуды автоэмиссионных токов не зависят от длительности испытаний (рис. 3).

Одинаковые тенденции уменьшения порогов начала автоэмиссии и рост автоэмиссионных токов для обоих видов плазменной обработки при увеличении длительности импульсов электрических полей свидетельствуют, согласно представлениям Фаулера и Нордгейма [8], о возрастании прозрачности потенциальных барьеров. Причиной этого является увеличение собственной (кинетической) энергии туннелирующих электронов с ростом длительности импульсов электрических полей. Различие в абсолютных значениях порогов начала автоэмиссии и автоэмиссионных токов может быть объяснено различием встроенных поверхностных потенциалов и дипольных моментов эмитирующих поверхностей, которые формируются при плазменном травлении кристаллов кремния в различных химических активных средах [7,9].

При использовании низкоэнергетической плазмы аргона травление осуществляется по ионно-физическому механизму за счет распыления атомов кремния и частиц его естественного окисла ускоренными ионами. Благодаря

инертности аргона химические связи с поверхностными атомами кремния не образуются. В результате такой обработки поверхность кремния приобретает структуру и плотность оборванных (ненасыщенных) связей, характерных для атомно-чистой поверхности кремния заданной кристаллографической ориентации [10]. Поверхностные атомы кремния, имеющие ненасыщенную химическую связь, действуют как дырочные ловушки, заряжаясь положительно при отдаче электронов в зону проводимости полупроводника и/или при их туннелировании в бомбардирующий ион аргона, когда их электронные волновые функции перекрываются. Это приводит к ухудшению проводимости приповерхностного слоя и образованию в нем трехвалентного кремния с положительным зарядом.

При плазмохимическом травлении кремния в CF_4 химически активными частицами являются ионы C^+ , CF_n^+ , где $n = 1 \dots 4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора, которые при хемосорбции образуют адкомплессы $\text{Si}-\text{C}$ и $\text{Si}-\text{F}$ [5]. Хемосорбированные комплексы SiC и SiF имеют сильные энергии химической связи (4.55 и 5.6 eV соответственно), которые превышают энергию химических связей атомов кремния (3.38 eV), и пассивируют часть оборванных (ненасыщенных) химических связей поверхностных атомов кремния, уменьшая их поверхностную плотность.

Формирование ненасыщенных электронных связей при плазмохимическом травлении приводит к образованию на поверхности кремния встроенного положительного заряда, поверхностная плотность которого выше в случае использования плазмы аргона. Вследствие этого при обработке в плазме хладона-14 уменьшаются (по сравнению с таковыми при обработке в плазме аргона) величина приповерхностного электрического поля, направленного в объем полупроводника, а также степень обеднения приповерхностной области кремния основными носителями. Это приводит к уменьшению порогов „включения“ проводимости и полевой эмиссии. При одинаковой величине внешнего электрического поля

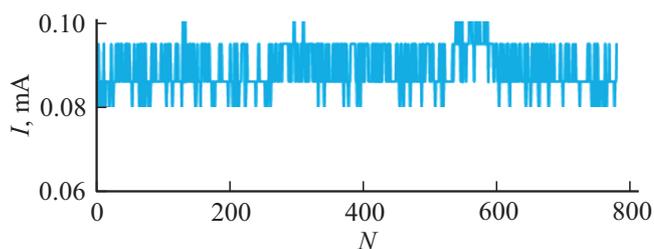


Рис. 2. Зависимость амплитуд анодных токов от количества импульсов с длительностью $10\ \mu\text{s}$ для кристаллов *p*-типа, обработанных в плазме аргона.

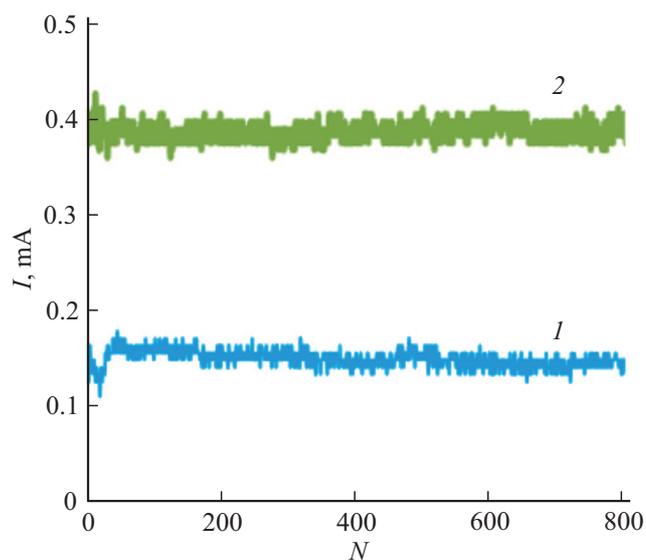


Рис. 3. Зависимости амплитуд автоэмиссионных токов от количества импульсов анодных напряжений длительностью 10 (1) и $50\ \mu\text{s}$ (2) при напряженностях поля, превышающих порог автоэмиссии на $10\ \text{V}/\mu\text{m}$, для кристаллов кремния с плазменной обработкой в среде CF_4 .

автоэмиссионный ток катодной матрицы, обработанной в плазме хладона-14, увеличивается (рис. 1). Однако это увеличение не является достаточно существенным, как это следовало бы ожидать из снижения порогов начала автоэмиссии и представлений Фаулера и Нордгейма. Причиной этого является высокая электроотрицательность атомов фтора, которые увеличивают дипольный момент эмитирующих центров из-за присутствия на поверхности кремния диполей Si–F [9]. Влияние дипольного момента эмитирующей поверхности обнаруживается при увеличении длительности импульсов анодных напряжений: из-за увеличения кинетической энергии электронов в сильных импульсных электрических полях уменьшается длительность их кулоновского взаимодействия с поверхностными диполями. Это способствует ускоренному росту автоэмиссионных токов и более сильному уменьшению порогов автоэмиссии при длительностях импульсов более $30\ \mu\text{s}$ (рис. 1).

В процессе полевой эмиссии одновременно осуществляется динамическая нейтрализация поверхностных ловушек захвата дрейфующими к поверхности под действием импульсов анодного напряжения электронами. При плазменной обработке кристаллов кремния в среде аргона их заполнение осуществляется достаточно быстро и выражается в практически мгновенном выходе на стационарный режим огибающих амплитуд анодных напряжений уже при длительности импульсов около $10\ \mu\text{s}$ (рис. 2). При плазмохимической обработке кристаллов кремния в среде хладона-14 уменьшение огибающих амплитуд анодных импульсов в процессе долговременных испытаний с короткими длительностями импульсов, вероятнее всего, обусловлено увеличением суммарного дипольного момента эмиссионной поверхности. Увеличение происходит в результате адсорбции электронов в поверхностных ловушках захвата и ослабления за счет этого кулоновского взаимодействия между зарядами, образующими диполи Si–F. При длительностях более $30\ \mu\text{s}$ увеличиваются собственная энергия и прозрачность потенциальных барьеров для туннелирующих электронов. Благодаря этому в процессе долговременных испытаний амплитуды автоэмиссионных токов увеличиваются, а их выход в стационарный режим происходит практически мгновенно (кривая 2 на рис. 3).

Финансирование работы

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

Список литературы

- [1] Marcus R.B., Ravi T.S., Gmitter T. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 3. P. 236–238.
- [2] Velásquez-García L.F., Guerrero S., Niu Y., Akinwande A.I. // IEEE Trans. Electron Dev. 2011. V. 58. N 6. P. 1783–1791.
- [3] Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний — материал нанoeлектроники. М.: Техносфера, 2007. 352 с.
- [4] Успехи нанотехнологий: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томсона. М.: Техносфера, 2011. 496 с.
- [5] Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
- [6] Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я. // ФТП. 2017. Т. 51. В. 4. С. 558–562.
- [7] Яфаров Р.К. // ФТП. 2019. Т. 53. В. 1. С. 18–25.
- [8] Fowler R.H., Nordheim L. // Proc. Roy. Soc. London. A. 1928. V. 119. N 781. P. 173–181.
- [9] Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 13. С. 68–74.
- [10] Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.