

Многоострийные полупроводниковые полевые эмиттеры с двухслойными защитными покрытиями нового типа

© Г.Г. Соминский,¹ Т.А. Тумарева,¹ Е.П. Тарадаев,¹ М.В. Мишин,¹ А.Н. Степанова²

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

² Институт кристаллографии РАН,
119333 Москва, Россия
e-mail: sominski@rphf.spbstu.ru

(Поступило в Редакцию 1 июня 2014 г.)

Исследована работа многоострийных полевых эмиттеров из кремния с двухслойными металл-фуллереновыми защитными покрытиями нового типа в условиях технического вакуума. Проведенные эксперименты свидетельствуют, что созданные катоды обеспечивают средние по поверхности катода плотности тока эмиссии $\sim 0.5 \text{ A/cm}^2$ и могут быть использованы в высоковольтных приборах, в том числе в устройствах СВЧ-электроники, а также в портативных источниках рентгеновского излучения.

Введение

Использование полевых эмиттеров представляется привлекательным при построении широкого класса вакуумных электронных устройств. Для получения полевой эмиссии при умеренных рабочих напряжениях создают острийные полевые эмиттеры, обеспечивающие большое усиление электрического поля у поверхности. Однако такие эмиттеры достаточно долговечны только в приборах, эксплуатируемых при низком давлении остаточного газа и при отборе малых токов. В высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме и при отборе больших токов, такие полевые эмиттеры быстро разрушаются под действием бомбардировки ионами остаточных газов.

Для получения токов, необходимых для функционирования многих электронных приборов, используют многоострийные структуры. Хорошо отработана технология создания многоострийных полевых эмиттеров из разного типа полупроводников, например из кремния [1]. Применение таких эмиттеров зачастую затруднено не только потому, что они разрушаются под действием ионной бомбардировки, но также и по той причине, что они имеют недостаточную проводимость. Кроме того, тонкие полупроводниковые острийные эмиттеры, как правило, недостаточно прочны и разрушаются под действием пондеромоторных сил уже при умеренных значениях электрического поля и отбираемого тока эмиссии. Использование острийных полупроводниковых полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме (10^{-7} – 10^{-8} Тор), становится возможным, если одновременно повысить их проводимость и прочность, а также устойчивость к воздействию ионной бомбардировки.

Легирование полупроводниковых материалов позволяет в принципе заметно увеличить их проводимость. Однако прочность острийных полевых эмиттеров, изготовленных из сильно легированных полупроводников, как правило, невелика. Как показано в работе [2],

проводимость плохо проводящей поверхности полевого эмиттера может быть повышена, если на него нанести даже тонкий слой металла. Авторы [2] исследовали исходно плохо проводящие полевые эмиттеры с тонким (4 nm) слоем никеля на поверхности. Такой слой металла повышал проводимость поверхности эмиттера. Но очевидно, что столь тонкое покрытие не может существенно увеличить его прочность. Не может такая металлизация и защитить эмиттер от разрушающего воздействия ионной бомбардировки. Поэтому она практически не повышает долговечности эмиттера при его эксплуатации в техническом вакууме.

Авторами работ [3–9] при исследовании одноострийных полевых эмиттеров из вольфрама было показано, что такие эмиттеры могут быть эффективно защищены от разрушающего воздействия ионной бомбардировки с помощью фуллереновых покрытий. Чисто фуллереновые покрытия из молекул C_{60} имеют большую работу выхода (~ 5.3 – 5.4 эВ). Но работа выхода фуллереновых покрытий может быть уменьшена в результате их обработки (активирования) потоком медленных (с энергиями ~ 40 – 100 эВ) ионов калия [5]. Активирование потоком ионов калия понижает работу выхода покрытия из-за образования в покрытии устойчивых металлофуллеренов типа эндоэдралов $\text{C}_{60}@\text{K}$ и/или экзоэдралов $\text{K}@\text{C}_{60}$ [7]. Тонкие фуллереновые покрытия (толщиной ~ 2 – 4 монослоя) самовоспроизводятся в присутствии интенсивной ионной бомбардировки. Поэтому острийные эмиттеры из вольфрама с таким покрытием долговечно работают при эксплуатации катода в техническом вакууме [7–9].

Авторы [3–9] исследовали работу с фуллереновыми покрытиями только острийных полевых эмиттеров из вольфрама. Можно предположить, что фуллереновые покрытия могут быть использованы для защиты от ионной бомбардировки не только металлических, но и полупроводниковых катодов. Однако такая возможность требует проверки. Понятно, что тонкий слой молекул фуллеренов и/или металлофуллеренов (несколько моно-

слоев) не может существенно увеличить ни прочность острийного эмиттера, ни проводимость его поверхности.

В настоящей работе решаются задачи по улучшению характеристик острийных полупроводниковых полевых эмиттеров, в том числе по повышению их долговечности, увеличению их проводимости (а вместе с этим уменьшению падения напряжения на эмиттере при отборе тока), увеличению прочности эмиттеров (и обеспечению в связи с этим отбора больших токов эмиссии). Как следует из полученных данных, перечисленные задачи могут быть решены одновременно при использовании полупроводниковых катодов со специальными описанными ниже двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями.

Методика измерений и аппаратура

Были исследованы острийные полевые эмиттеры из кремния. Измерялись токи эмиссии эмиттеров без каких-либо покрытий, с покрытиями из молибдена, а также с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями. Эмиссионные характеристики катодов контролировались в статическом и в импульсном ($2-6 \mu\text{s}$, 100 Hz) режимах. Измерения проводились в диодной измерительной системе (рис. 1), созданной на основе полевого эмиссионного проектора. Здесь 1 — полевой эмиттер с подогревателем 2, 3 — экран проектора, выполняющий одновременно функцию анода, 4 — источник напряжения U , которое подавалось между полевым эмиттером (катодом) и анодом, 5 — прибор для измерения тока полевой эмиссии. Экран 3 располагался на расстоянии 1–3 см от торца эмиттера 1. В процессе измерений можно было наблюдать эмиссионные изображения полевого эмиттера на экране проектора.

У эмиттеров, изображенных на рис. 1, на торцевой поверхности цилиндрического кремниевого штабика (1) диаметром 1 мм сформированы кремниевые острия, которые и являлись источником полевой эмиссии. Количество острий на этой поверхности менялось у исследованных катодов от 1 приблизительно до 350. Морфология поверхности полевых эмиттеров контролировалась с использованием растрового электронного микроскопа типа Supra 45 WDXC до установки в экспериментальный прибор и после окончания экспериментов. На рис. 2 показано полученное с помощью растрового электронного микроскопа изображение участка поверхности многоострийного кремниевого эмиттера.

Радиус R вершины кремниевых острий варьировался для разных образцов в пределах примерно от 5 до 25 нм. Высота острий h менялась приблизительно от 5 до 40 мкм. Менялись также и расстояния l между остриями. При этом для исследованных многоострийных полевых эмиттеров отношение l/h не превышало значений $\sim 1-1.5$. При такой морфологии поверхности не исключается частичная экранировка острийных полевых эмиттеров, приводящая в диодной структуре заданной конфигурации к уменьшению электрического поля у поверхности острий и к увеличению рабочих напряжений,

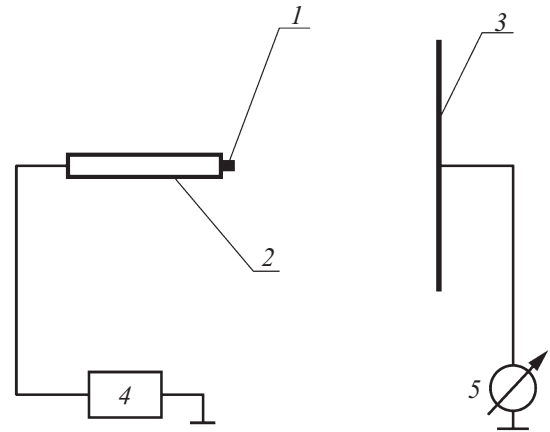


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной системы, использованной для контроля эмиссионных характеристик острийных полевых эмиттеров. 1 — полевой эмиттер с подогревателем 2, 3 — экран проектора, выполняющий одновременно функцию анода, 4 — источник напряжения U , которое подавалось между полевым эмиттером (катодом) и анодом, 5 — прибор для измерения тока полевой эмиссии.

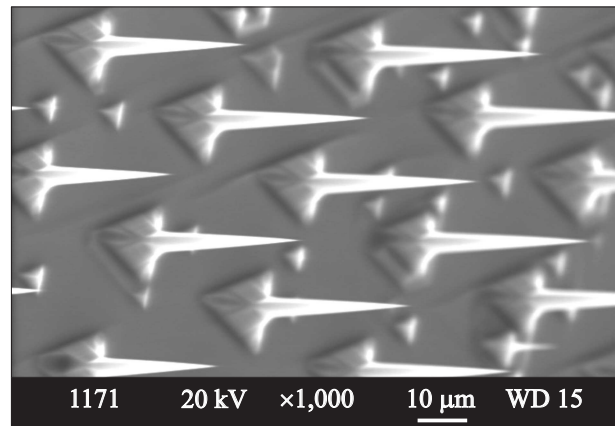


Рис. 2. Изображение участка поверхности многоострийного кремниевого эмиттера.

необходимых для отбора фиксированных токов полевой эмиссии [10].

Вакуумная камера экспериментального прибора была оснащена испарителем молибдена, который использовался для нанесения молибденовых покрытий на полевой эмиттер, источником типа ячейки Кнудсена для напыления молекул фуллерена C_{60} , а также источником ионов калия, который использовался для обработки (активирования) фуллереновых покрытий. Полевой эмиттер крепился на подвижной подвеске и его можно было оперативно перемещать в откачиваемом приборе с помощью специального манипулятора к напылителю молибдена (для создания металлизации), к напылителю фуллеренов (для создания фуллеренового покрытия) и к источнику ионов калия (для активирования фуллеренового покрытия).

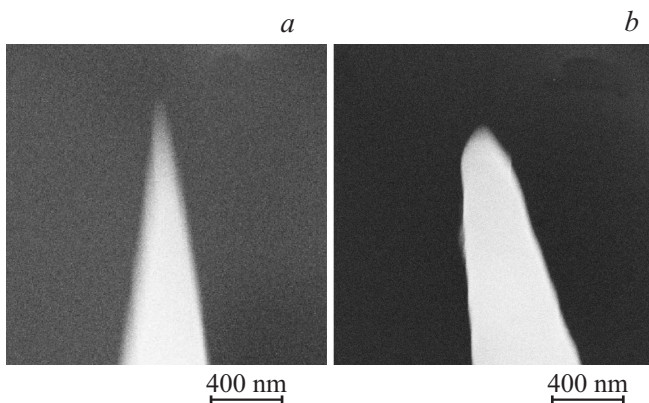


Рис. 3. Изображения кремниевого острья, полученные до (а) и после (b) нанесения молибденового покрытия.

Толщина фуллереновых покрытий измерялась с использованием разработанной ранее методики [3–9] на основе так называемых характеристик напыления (зависимостей характерного напряжения U_{ch} , необходимого для получения фиксированного тока полевой эмиссии, от времени напыления молекул фуллерена). Для определения толщины молибденового покрытия сравнивались изображения острий на поверхности эмиттера, полученные с помощью растрового электронного микроскопа до и после нанесения покрытия. На рис. 3 показаны типичные изображения вершины острья до и после нанесения молибденового покрытия.

Экспериментальный прибор подвергался непрерывной откачке с помощью высоковакуумного магниторазрядного насоса. Прибор был оснащен системой напуска азота. Напуск азота позволял оперативно менять давление в экспериментальном приборе от минимального порядка 10^{-10} – 10^{-9} Тор до 10^{-6} Тор и обратно. Формирование покрытий производилось, как правило, при давлениях порядка 10^{-9} Тор. Для получения информации о функционировании катодов в техническом вакууме измерение эмиссионных характеристик катодов проводилось при повышенных давлениях $\sim 10^{-7}$ Тор.

Результаты измерений

Проведенные измерения свидетельствуют, что прочность острийных полевых эмиттеров, изготовленных из сильно легированного кремния n -типа с довольно высокой проводимостью $\sim 10^3$ – 10^4 Ом $^{-1}$ см $^{-1}$, невелика. Поэтому такие эмиттеры разрушаются при отборе с их поверхности токов, не превышающих приблизительно 10–30 мкА со структуры из 50 острий с радиусом вершины порядка 20 нм. Эмиттеры из кремния p -типа с низкой в холодном состоянии проводимостью ~ 10 Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ прочнее и поэтому позволяют отбирать большие токи, однако, только в условиях, когда их проводимость увеличена нагревом до температуры ~ 200 – 400° С. Создание даже тонкого (~ 4 – 6 нм) молибденового покрытия обеспечивает достаточную проводимость поверхности

эмиттеров из кремния p -типа. Для того чтобы увеличить прочность острийного полевого эмиттера, приходится создавать на его поверхности слой молибдена толщиной порядка или даже больше радиуса их вершины.

Острийные полевые эмиттеры из кремния с молибденовым покрытием при работе с отбором больших токов в техническом вакууме разрушаются под действием ионной бомбардировки. Как показали проведенные измерения, нанесение поверх молибденового покрытия, 2–4 монослоев молекул фуллерена делает острийный полевой эмиттер стойким к воздействию ионной бомбардировки. Однако нанесение такого покрытия сопровождается увеличением примерно на 10% рабочих напряжений, необходимых для отбора фиксированных токов эмиссии. В результате обработки созданного фуллеренового покрытия потоком медленных ионов калия с энергией 40 эВ (активирование покрытия) удавалось снизить рабочие напряжения приблизительно на 25%.

Полученные данные свидетельствуют, что острийный полевой эмиттер с двухслойным покрытием, включающим слой молибдена с нанесенным поверх него активированным фуллереновым покрытием, долговечно работает в техническом вакууме при отборе больших токов. Увеличение толщины молибденового покрытия при неизменном по толщине фуллереновом покрытии позволяет повысить прочность острий и обеспечить получение больших эмиссионных токов. Однако утолщение молибденового покрытия ведет к увеличению диаметра вершины острий и к повышению в связи с этим напряжений, необходимых для отбора фиксированных токов.

Типичные эмиссионные характеристики многоострийного (примерно 300 острий с радиусом вершины ~ 20 нм) полевого эмиттера из кремния p -типа с покрытием острий, включающим слой молибдена толщиной ~ 30 нм и нанесенное поверх металлизации активированное в результате бомбардировки ионами калия фуллереновое покрытие толщиной 2 монослоя,

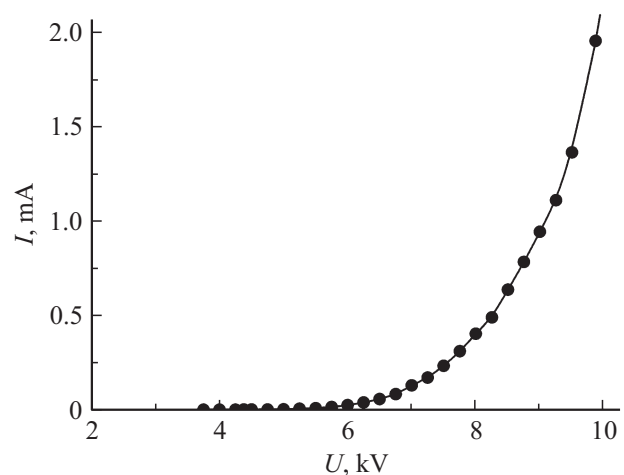


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика $I(U)$ многоострийного катода, измеренная в импульсном режиме (2μ s, 100 Нз). Давление $\sim 10^{-7}$ Тор.

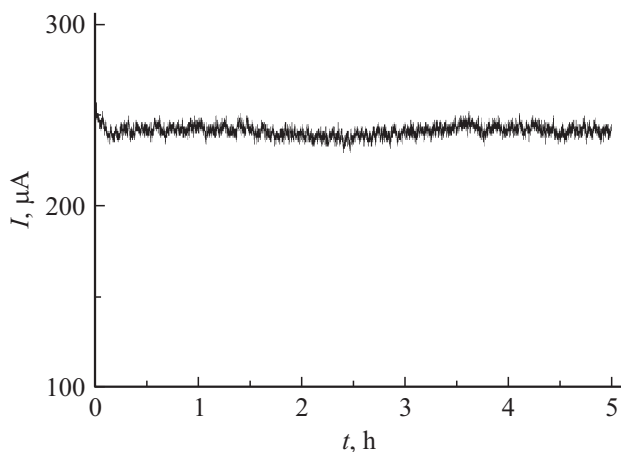


Рис. 5. Зависимость тока эмиссии от времени работы многоострийного катода $I(t)$, измеренная при постоянном напряжении $U = 6.3$ kV. Давление $\sim 10^{-7}$ Тор.

показаны на рис. 4 и 5. Вольт-амперная характеристика $I(U)$, измеренная в импульсном режиме, показана на рис. 4. Максимальные токи катода достигали $\sim 1-2$ mA. Средняя по поверхности катода плотность тока эмиссии при полном токе 2 mA была порядка 0.5 A/cm². Зависимость тока эмиссии от времени работы катода $I(t)$, приведенная на рис. 5, получена в статическом режиме при постоянном напряжении $U = 6.3$ kV и типичном техническом давлении в экспериментальном приборе $\sim 10^{-7}$ Тор. В таких условиях ток эмиссии слабо менялся в течение 5 h. Флуктуации тока не превышали приблизительно $\pm 2-3\%$. При измерении характеристик $I(t)$ наибольший интервал времени работы эмиттеров в течение одного дня не превышал 5–7 h. Однако высокую долговечность созданных острийных полевых эмиттеров при эксплуатации в техническом вакууме подтверждают многократные длительные измерения характеристик $I(t)$ данного катода, выполненные в разные дни. Полученный в статическом режиме ток эмиссии 240 μ A соответствует чрезвычайно большому значению плотности тока $\sim 10^3-10^4$ A/cm² с каждого из острий полевого эмиттера.

Таким образом, в проведенных экспериментах получены данные, свидетельствующие о возможности практической реализации острийных полевых эмиттеров из кремния с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями.

Заключение

Созданные и исследованные многоострийные кремниевые полевые эмиттеры с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями устойчивы к ионной бомбардировке и могут быть использованы для получения больших токов эмиссии в высоковольтных вакуумных приборах, работающих в техническом вакууме, в том числе в устройствах СВЧ-электроники, а также в портативных источниках рентгеновского излучения.

Проведенные исследования были поддержаны грантом правительства Российской Федерации (договор № 11.G34.31.0041 с Министерством образования и науки) и грантом РФФИ № 11-02-00425.

Список литературы

- [1] Гиваргизов Е.И. // Кристаллография. 2006. Т. 51. № 5. С. 947–953.
- [2] Karabutov A.V. et al. // J. De Physique IV. 1996. C5 P. 113.
- [3] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Ефремов А.А., Поляков А.С. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 105–110.
- [4] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Поляков А.С. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 111–115.
- [5] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Веселов А.А., Светлов И.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 81–84.
- [6] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 11. С. 119–122.
- [7] Соминский Г.Г., Тумарева Т.А. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. Вып. 3. С. 17–54.
- [8] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 121–124.
- [9] Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Пантелева И.С. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 1. С. 114–119.
- [10] Бочаров Г.С., Елецкий А.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 126–130.