

Краткие сообщения

11;12

Эффективные электронные источники на основе полевой эмиссии

© Н.В. Егоров,¹ Л.И. Антонова,¹ С.Р. Антонов,¹ Д.В. Жуков,¹ Л.-Ц. Чао²¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия² Тайваньский национальный политехнический университет,
10672 Тайбэй, Тайвань
e-mail: negoro@arpmath.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 18 сентября 2008 г.)

Созданы и исследованы полевые эмиссионные катоды $W-Cs_3Sb$, $W-TiO_2$ и $W-TiO_2-Cs$. На всех типах катодов получены лучшие по сравнению с традиционным вольфрамовым катодом эмиссионные характеристики: ток эмиссии на 1.5–2 порядка выше, причем достигнута высокая стабильность тока. Предложены и экспериментально подтверждены физические модели данных эмиттеров.

PACS: 79.70+q

Введение

В настоящее время в литературе обсуждается новый механизм полевой эмиссии из сложных систем металл–полупроводник, приводящий к снижению порогового напряжения эмиссионного тока по сравнению с чистым металлом [1,2]. Одной из таких систем является $Pt-TiO_2$. Благодаря созданию области пространственного заряда в полупроводнике за счет инжекции электронов из металла эффективный поверхностный барьер на границе с вакуумом понижается, что приводит к появлению полевой электронной эмиссии при напряженности поля два порядка ниже, чем в полевой эмиссии из металла.

Цель наших работ состояла в поиске новых систем подобного типа и исследовании механизма работы полевых эмиттеров. В настоящей работе исследовались системы: вольфрам с напыленным тонким слоем полупроводника p -типа проводимости — Cs_3Sb ; вольфрам с тонким слоем полупроводника n -типа проводимости — TiO_2 и $W-TiO_2-Cs$.

Экспериментальная часть

Исследования проводились в сверхвысоковакуумной камере ($p \sim 10^{-9}$ Торр) при непрерывной откачке. Основная эмиттера изготавливалась методом электрохимического травления из поликристаллического вольфрама в виде острия. Была предусмотрена термическая очистка острия в вакууме. Критерием чистоты поверхности вольфрама служило появление характерных для вольфрама рефлексов на люминофорном экране.

В камере располагались источники с исследуемыми материалами для нанесения их на острие. Тонкий полупроводниковый слой p -типа проводимости Cs_3Sb формировался на очищенной поверхности вольфрамового острия последовательным испарением сурьмы и цезия.

Слой окиси титана (TiO_2) наносился на вольфрамовое острие путем испарения TiO_2 из нихромовой лодочки при нагреве ее проходящим током. Цезий поступал из источника с бихроматом цезия (Cs_2CrO_4) путем разложения его при разогреве и выделении цезия.

Контроль относительной толщины напыленного слоя проводился по изменению времени нагрева лодочки и последовательному контролю за изменением проекционной картины на люминофорном экране от чистого вольфрама, картина которого хорошо известна [3], до появления рефлексов, связанных с появлением покрытия на нем.

На основе этих систем были получены эффективные эмиттеры, у которых эмиссионная способность больше на полтора–два порядка по сравнению с чистым вольфрамом.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) систем $W-TiO_2$, $W-Cs_3Sb$ и чистого вольфрама, изготовленные в оптимальных режимах.

Среднее значение работы выхода, оцененное по наклону ВАХ для $W-TiO_2$, составляет 2.9, для $W-Cs_3Sb$ — 3.6, в то время как для чистого вольфрама оно близко к 4.5 eV. Меньшее значение работы выхода системы $W-TiO_2$ по сравнению с системой — $W-Cs_3Sb$ определяет большую эффективность данных катодов.

Изучение механизма работы катода показывает, что граница вольфрам– Cs_3Sb является ответственной за величину работы выхода всей системы, так как контактная разность потенциалов (КРП) на границе W и Cs_3Sb составляет около 3 eV, что намного превышает значение электронного сродства Cs_3Sb , составляющее около 5 eV. А при наличии изгиба зон на границе с вакуумом эффективное электронное сродство близко к нулевому.

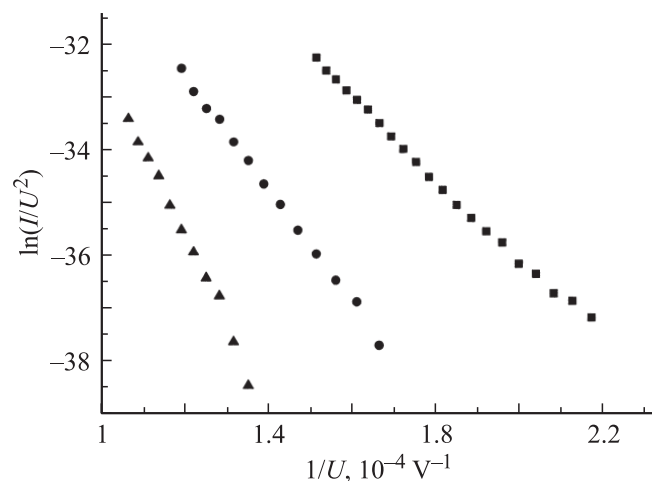


Рис. 1. Типичные вольт-амперные характеристики полевой эмиссии систем W–TiO₂ (■), W–Cs₃Sb (●), W (▲). I — эмиссионный ток, U — прикладываемое напряжение.

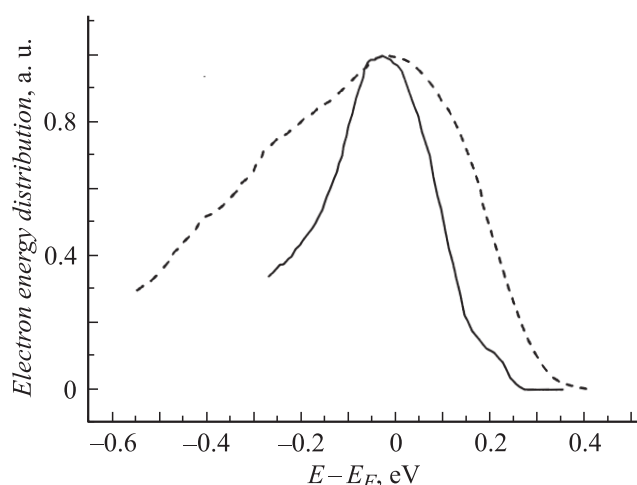


Рис. 2. Энергетическое распределение электронов систем W–Cs₃Sb (сплошная кривая) и W–TiO₂ (пунктир).

Для системы W–TiO₂, согласно энергетической модели, высота барьера на границе вольфрам–оксид титана небольшая и составляет около 0.1 eV. Электроны из металла, где их много в зоне проводимости, легко переходят в полупроводник, образуя область пространственного заряда, которая при определенной концентрации электронов может сделать полупроводник вырожденным, что уменьшит высоту барьера на границе с вакуумом.

Кривые энергетического распределения электронов (КЭРЭ) для обоих типов катодов представлены на рис. 2.

Максимумы кривых расположены при одной энергии электронов, соответствующей энергии Ферми вольфрама из-за того, что основным „поставщиком“ электронов в обоих случаях является вольфрам. Полуширина КЭРЭ для W–TiO₂ — около 0.6 eV, в то время как для

W–Cs₃Sb она составляет ~ 0.3 eV. Эту разницу в полуширинах КЭРЭ можно объяснить тем, что в системе W–Cs₃Sb электроны, попавшие в тонкий слой полупроводника, практически пробегают его без столкновения и „вылетают“ в вакуум. Для системы W–TiO₂ наличие области пространственного заряда в полупроводнике вносит некоторый разброс по энергиям электронов.

В отличие от системы W–Cs₃Sb, где высота барьера между металлом и полупроводником определяет работу выхода системы, в случае W–TiO₂ ответственным за работу выхода является барьер на границе полупроводника и вакуума. Это наводит на мысль о компромиссном решении при выборе материалов системы, направленном на повышение эффективности, — об уменьшении барьера Шоттки на границе металл–полупроводник и сохранении низкого электронного сродства на поверхности эмиттера. С этой целью на поверхность системы W–TiO₂ был нанесен тонкий слой цезия, который снижает работу выхода вольфрама до 1.7 eV [4]. Предполагалось, что для системы W–TiO₂ можно также ожидать снижения работы выхода на границе с вакуумом.

На рис. 3 приведено сравнение эмиссионной эффективности эмиттеров W–TiO₂ и W–TiO₂–Cs. Для последней системы наблюдается резкое (на порядок) повышение эмиссионного тока и снижение порогового значения напряжения с 6 до 4 kV.

Разница работ выхода между W–TiO₂ и W–TiO₂–Cs, оцененная по наклону ВАХ, составляла около 1.2 eV. В отличие от системы W–Cs, которой свойственна большая нестабильность, система W–TiO₂–Cs имеет значительное преимущество. За сутки хранения эмиттера в СВВ-камере при непрерывной откачке чувствительность его не изменилась. Это видно из рис. 4, в котором вольт-амперные кривые для первого и второго дня совпадают. Такое поведение можно объяснить довольно крепкой связью цезия с поверхностью, что подтверждает картина на люминофорном экране. Фотография рабочей поверхности эмиттера W–TiO₂–Cs (рис. 5) показывает стабильное, яркое свечение всей поверхности острия.

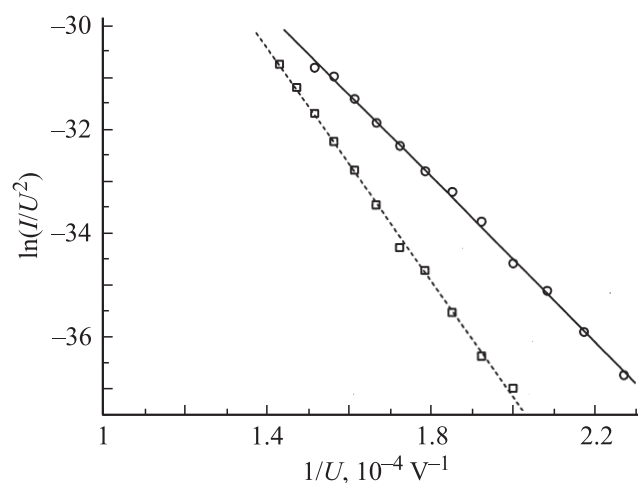


Рис. 3. Типичные вольт-амперные характеристики полевой эмиссии систем W–TiO₂ (□), W–TiO₂–Cs (○).

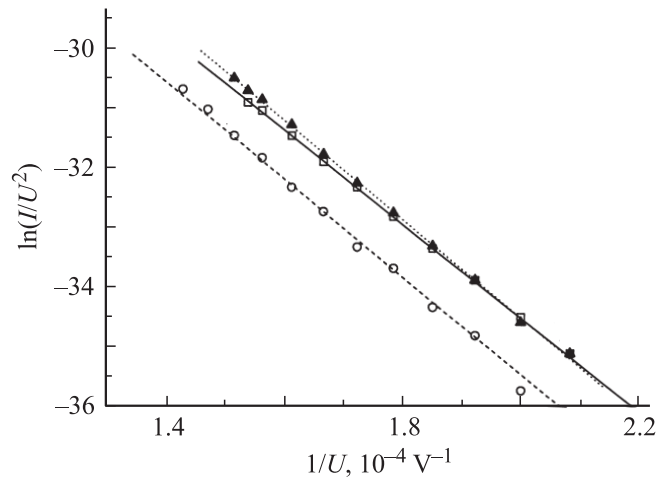


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики полевой эмиссии системы $W-TiO_2-Cs$ при различных значениях времени хранения: \square — 3 min, \blacktriangle — 24 h, \circ — 15 суток.

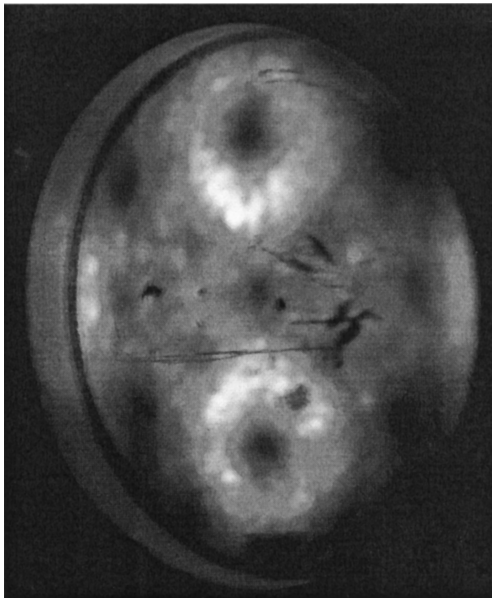


Рис. 5. Фотография проекционной картины системы $W-TiO_2-Cs$.

Длительное хранение в течение 15 суток снизило чувствительность вдвое (см. рис. 4). Из наклона ВАХ следует, что значение работы выхода системы во время длительного хранения не изменилось, что может быть связано, по-видимому, с условиями на поверхности.

Экспозиция кислорода приводила к снижению эмиссионного тока системы. Это подтверждает наличие крепкой связи цезия с подложкой, поскольку при слабой связи были бы возможны миграция атомов Cs по поверхности и образование окисей цезия. Таким образом, нанесение тонкого слоя цезия на поверхность $W-TiO_2$ повышает эффективность и стабильность эмиттера.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получены полевые катоды $W-TiO_2$, показывающие при сопоставимых напряжениях ток эмиссии, на 1.5 порядка больший, чем традиционные вольфрамовые катоды.

2. Сравнение параметров полевых эмиссионных систем $W-Cs_3Sb$ и $W-TiO_2$ показывает преимущество первого по полуширине распределения эмитированных электронов, и второго — по эмиссионной чувствительности.

3. Энергетические модели полевых эмиссионных систем $W-Cs_3Sb$ и $W-TiO_2$ получили экспериментальное подтверждение, что позволило реализовать модель более перспективного эмиттера $W-TiO_2-Cs$, демонстрирующего высокую стабильность эмиссионного тока.

Работа осуществлена в рамках совместного исследовательского проекта СПбГУ и NTUST N RP07-06.

Список литературы

- [1] *Binh V.T., Adessi Ch.* // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 85. N 4. P. 864–867.
- [2] *Semet V., Binh V.T.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2005. Vol. 23. P. 824–830.
- [3] *Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В.* Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
- [4] *Соммер А.* Фотоэмиссионные материалы. М.: Энергия, 1973. (*Sommer A.* Photoemissive materials. NY: Wiley, 1968.)