



Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН

VII Всероссийская Микроволновая конференция



25-27 ноября 2020 г.

ДОКЛАДЫ

МОСКВА – 2020г.



Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН

VII Всероссийская Микроволновая конференция¹

25 – 27 ноября 2020 г., Москва

ДОКЛАДЫ

Организаторы конференции:

- Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
- Научный совет РАН по распространению радиоволн
- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (РНТОРЭС им. А.С.Попова)
- MTT-ED Moscow Chapter IEEE
- IEEE Russia Section
- IEEE Moscow AP Chapter

Любая часть материалов может быть скопирована, воспроизведена либо использована каким-либо другим образом только с письменного согласия редакции JRE (Журнал Радиоэлектроники) либо авторов публикаций. При использовании материалов и/или результатов публикаций авторов для научной работы ссылка на материалы настоящей конференции является ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ.

©Издание JRE – ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва 2020 г.

МОСКВА 2020

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ДИОДНЫХ И ТРИОДНЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛОВ ГГц ДИАПАЗОНА

*Евсиков И.Д., Грязнева Т.А., Филиппов Н.А., Демин Г.Д., Дюжев Н.А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
evsikov.ilija@yandex.ru*

Предложен технологический маршрут формирования кремниевых диодных и триодных автоэмиссионных наноструктур острейного и лезвийного типа. Изготовленные экспериментальные образцы были исследованы с применением методик растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Получены вольт-амперные характеристики созданных экспериментальных образцов кремниевых автоэмиссионных структур. Результаты исследования могут быть использованы при создании автоэмиссионных наноструктур, применяемых при построении приборов высокочастотной электроники ГГц диапазона.

Введение

Устройства генерации и формирования высокочастотных сигналов являются неотъемлемой частью любой радиотехнической системы или технического комплекса СВЧ-электроники. В современных приборах и технических системах СВЧ-электроники могут применяться как полупроводниковые устройства с высокой подвижностью электронов на основе арсенида галлия (GaAs) или нитрида галлия (GaN), так и электровакуумные приборы с динамическим способом управления электронным потоком [1].

В основе принципа функционирования электровакуумных приборов, применяемых в высокочастотной электронике лежит явление электронной эмиссии. Электронная эмиссия – это процесс испускания твердым или жидким телом потока электронов, как правило, при условии придания им дополнительной энергии за счет того или иного внешнего воздействия: за счет электромагнитного излучения, нагрева и т.п. Автоэлектронная эмиссия в свою очередь не требует дополнительных внешних затрат энергии на инициацию эмиссионного процесса.

Устройства высокочастотной электроники могут создаваться как на основе термоэлектронных накаливаемых катодов, требующих подогрева, так и на основе «холодных» автоэмиссионных катодов. Последние имеют ряд важных преимуществ: экономичность, связанная с отсутствием необходимости постоянного накала катода, устойчивость к колебаниям температуры и радиационным эффектам накопленной дозы излучения, высокая крутизна вольт-амперной характеристики автоэмиссионных структур, обусловленная экспоненциальной зависимостью эмиссионного тока от приложенного коллекторного напряжения.

Предыдущие публикации по тематике исследования возможностей применения автоэмиссионных структур в качестве основы элементной базы для построения приборов СВЧ-электроники были посвящены преимущественно использованию металлических и углеродных эмиссионных структур [2, 3]. В данной работе рассматриваются технологические возможности создания автоэмиссионных наноразмерных диодных и триодных структур на основе кремния для использования в устройствах генерации сигналов ГГц диапазона.

Технология создания автоэмиссионных наноструктур

В настоящее время автоэлектронные эмиссионные структуры могут создаваться на основе металлов или полупроводников [4, 5], большое количество работ посвящено исследованию перспектив использования углеродных модификаций в качестве материала для создания автоэмиссионных структур [6, 7]. Перспективным материалом в области создания автоэмиссионных структур является кремний. Этот материал обладает высокой степенью воспроизводимости получаемых структур, достижение которой является достаточно серьезной технологической проблемой при создании однородных массивов автоэмиссионных структур на основе металлов или углеродных модификаций [8]. Использование кремния для изготовления автоэмиссионных катодов позволяет достичь очень малых радиусов скругления катодных вершин (в пределах нескольких ангстрем) [9], а, следовательно, получать высокие плотности тока и узкие электронные пучки с эмиссионных поверхностей малой площади. Высокая воспроизводимость технологического процесса создания автоэмиссионных структур на основе

кремния открывает также возможность создания эмиттерных массивов, обладающих строгой периодичностью, что особенно актуально при создании многолучевых приборов для генерации электронных пучков высокой плотности.

В данной работе представлены результаты разработки технологических маршрутов кремниевых автоэмиссионных структур острейного и лезвийного типа.

Технологический маршрут формирования автоэмиссионных кремниевых катодов лезвийного типа с наноразмерным радиусом кривизны кромки описан ниже (схематические изображения получаемых на каждом этапе структур представлены на Рисунке 1 под соответствующими буквенными обозначениями):

- а) окисление утоненных кремниевых пластин n-типа, легированных фосфором с диаметром 150 мм и ориентацией (100) и осаждение слоя нитрида кремния;
- б) проведение фотолитографии для формирования нитрид-оксидных масок ($\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$);
- в) анизотропное травление кремниевой пластины в 10% KOH при температуре 80 °C для формирования V-образных щелей;
- г) окисление лицевой и обратной стороны кремниевой пластины в атмосфере сухого кислорода;
- д) осаждение нитрида кремния на лицевую и обратную сторону кремниевой пластины;
- е) проведение фотолитографии и жидкостного травления;
- ж) жидкостное травление лицевой стороны пластины на всю глубину вдоль плоскости (111);
- з) отсоединение получившихся образцов кремниевых лезвийных катодов.

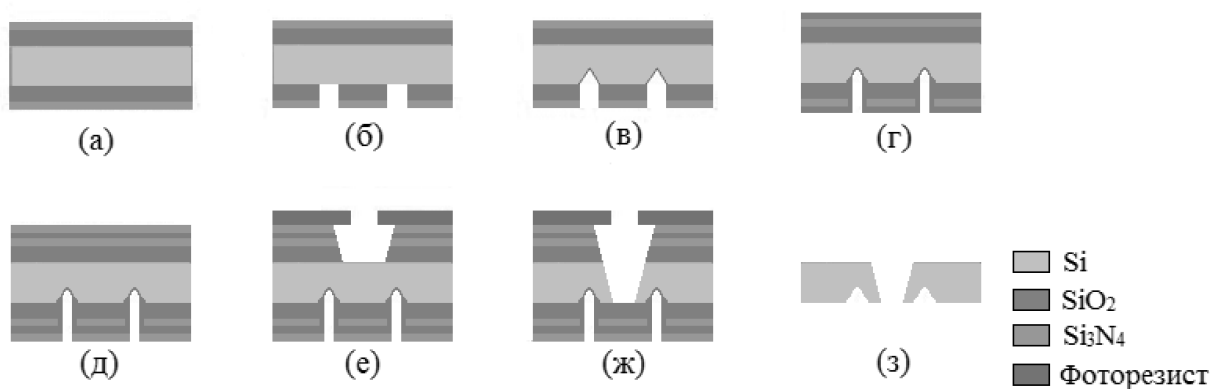


Рис. 1. Технологический маршрут кремниевых автоэмиссионных катодов лезвийного типа.

Описанная выше методика позволяет формировать кремниевые автоэмиссионные катоды лезвийного типа с высокой степенью воспроизводимости геометрии, поскольку угол при вершине кромки катода, в теории равный 54,75°, определяется взаиморасположением кристаллографических плоскостей 111 и 100 монокристаллического кремния.

Разработанный технологический маршрут реализуем на большинстве технологических линий, специализирующихся на изготовлении МЭМС/ИС с проектными нормами от 0,8 до 0,35 мкм. Результаты исследования экспериментальных образцов автоэмиссионных катодов лезвийного типа методом просвечивающей электронной микроскопии демонстрируют, что вершина кромки лезвийного катода состоит из нескольких атомарных слоев и имеет нанометровый радиус скругления.

Для получения массива наноразмерных кремниевых катодов острейного типа применялся следующий технологический маршрут (схематические изображения получаемых на каждом этапе структур представлены на Рисунке 2 под соответствующими буквенными обозначениями):

- а) глубокое травление кремниевых пластин n-типа, легированных фосфором с диаметром 150 мм и ориентацией (100), окисление и заполнение щелей поликремнием (толщина слоя 850 нм) для щелевой изоляции;
- б) формирование цилиндрических оксидных масок (SiO_2) посредством плазмохимического травления поликремния, фотолитографии и плазмохимического травления оксида кремния;
- в) плазмохимическое травление кремния в смеси SF_6 и O_2 для формирования бочкообразного профиля подтрава кремниевых столбиков;
- г) формирование вертикального «пьедестала» кремниевых столбиков ионной бомбардировкой;

- д) жидкостное удаление остатков оксидной маски и выступающих окисленных стенок щелевой изоляции, окисление кремниевых столбиков до образования наноразмерных острий;
- е) осаждение поликремния и имплантация фосфора в осажденный слой;
- ж) планаризация поликремния до вскрытия оксида кремния;
- з) осаждение оксида алюминия для пассивации;
- и) проведение фотолитографии, химического и плазменного травления слоев для вскрытия кремниевых острий.

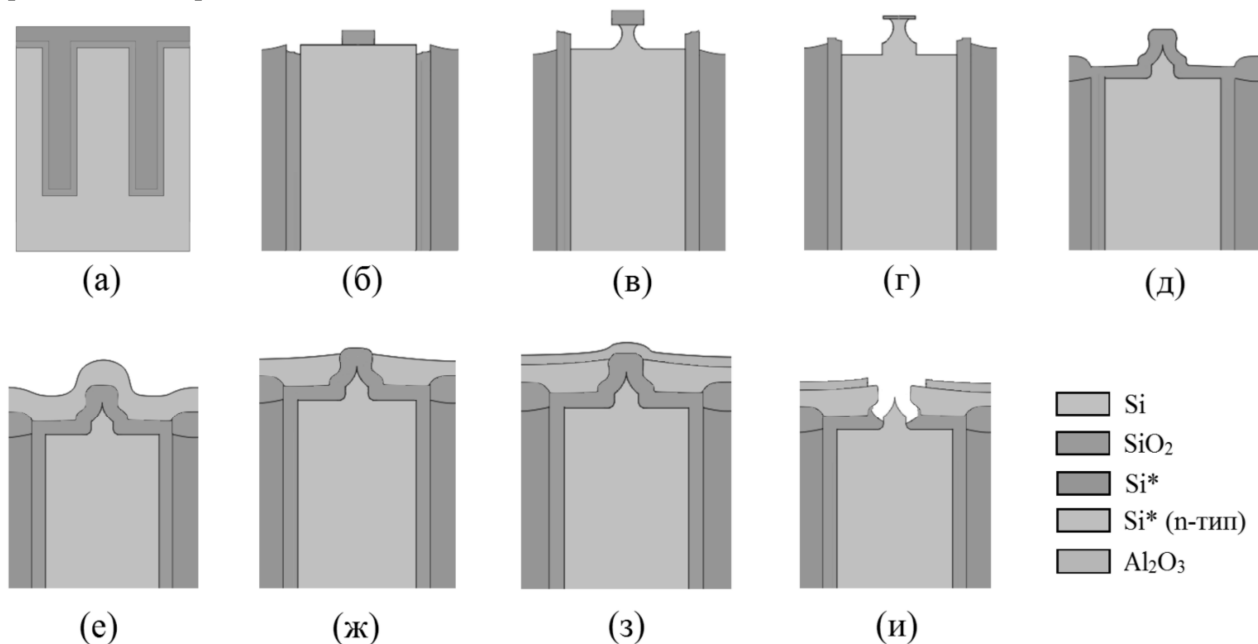


Рис. 2. Технологический маршрут массива кремниевых автоэмиссионных структур острейного типа.

Описанная методика позволяет получать массивы кремниевых автоэмиссионных структур острейного типа с наноразмерным радиусом скругления (4–5 нм) при вершине катода. В рамках проведенных исследований были созданы матрицы автоэмиссионных структур размерностью 300×300 элементов.

Результаты

Поверхность и структура экспериментального образца кремниевого автоэмиссионного катода лезвийного типа была исследована с использованием методик растровой электронной (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На рисунке 3 представлено изображение и геометрические размеры подтравки кремниевой пластины, полученного в результате проведения жидкостного травления (а), а также изображение экспериментального образца кремниевого автоэмиссионного катода лезвийного типа (б) и атомарная структура вершины грани катода (в). На рисунке 3а продемонстрирована величина угла при вершине кромки катода, которая составляет 53°, что очень близко к теоретическому значению. Как видно из рисунка 3в, вершина грани катода лезвийного типа состоит из нескольких атомных слоев кремния, а радиус скругления составляет не более 2 нм.

На рисунке 4 представлено изображение одиночного автоэмиссионного катода с сеточным электродом в составе матрицы катодно-сеточных узлов на основе кремния, полученное на растровом электронном микроскопе. Изображение наглядно демонстрирует, что радиус скругления автоэмиссионного катода составляет приблизительно 4,5 нм.

Для изготовленных образцов кремниевых автоэмиссионных катодов были получены экспериментальные вольт-амперные характеристики. На Рисунке 5а представлены вольт-амперные характеристики автоэмиссионного катода лезвийного типа, полученные при расстоянии «катод-анод» равном 40 мкм при вариации анодного напряжения от 0 до 2 кВ. На Рисунке 5б изображены вольт-амперные характеристики массива автоэмиссионных катодно-сеточных узлов, полученные при расстоянии «катод-анод» равном 30 мкм, работавших в диодном режиме, т.е. с нулевым потенциалом на сеточных электродах при вариации анодного напряжения от 0 до 3.3 кВ.

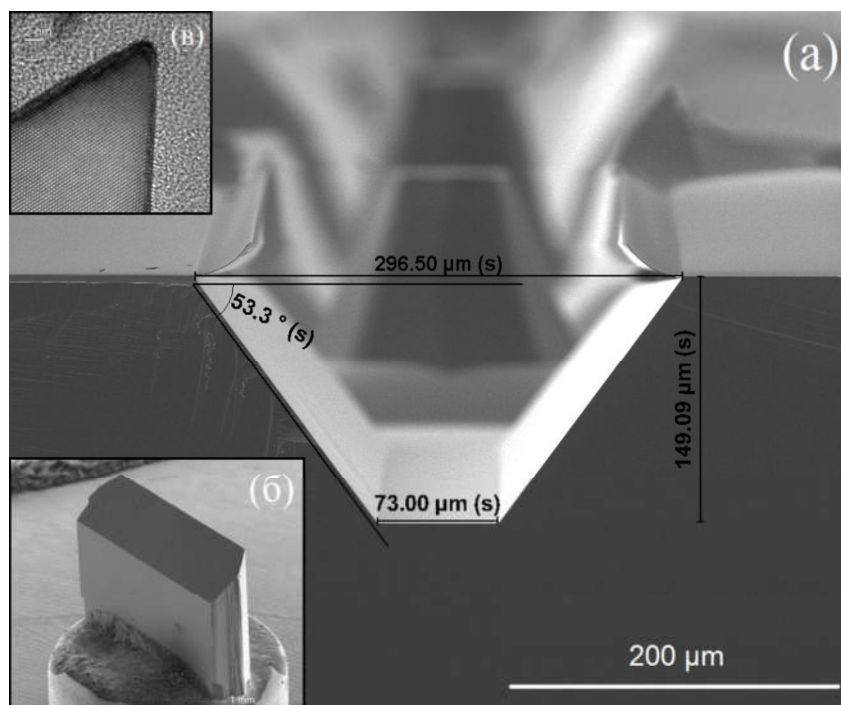


Рис. 3. РЭМ изображения: (а) подтравка кремниевой пластины после операции жидкостного травления; (б) экспериментального образца кремниевого автоэмиссионного катода лезвийного типа, зафиксированного клеем на металлическом цилиндре; (в) ПЭМ изображение атомарной структуры вершины грани катода лезвийного типа.

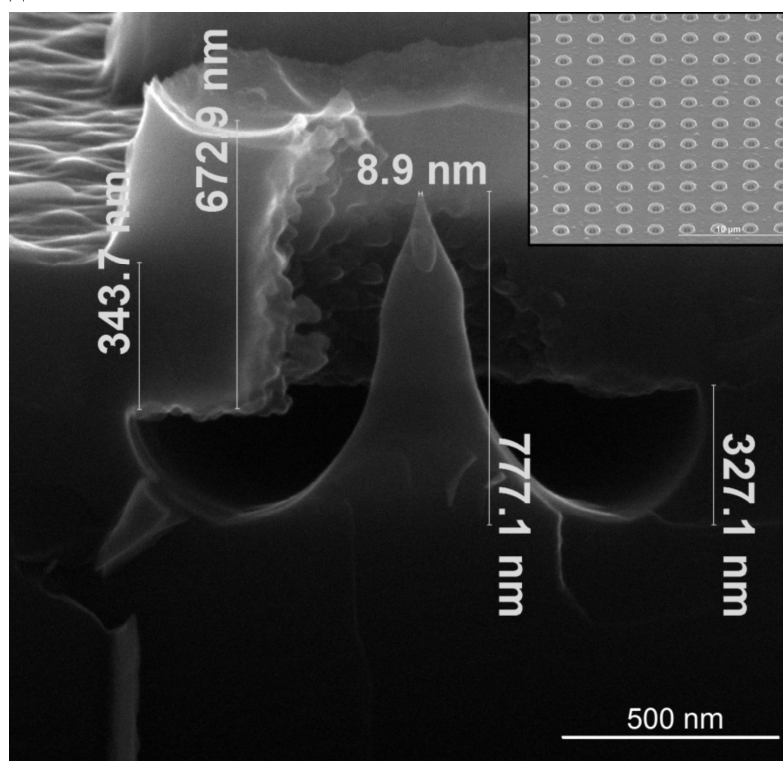


Рис. 4. Изображение одиночного автоэмиссионного катодно-сеточного узла на основе кремния. На вставке: изображение массива автоэмиссионных катодно-сеточных узлов со вскрытыми катодами.

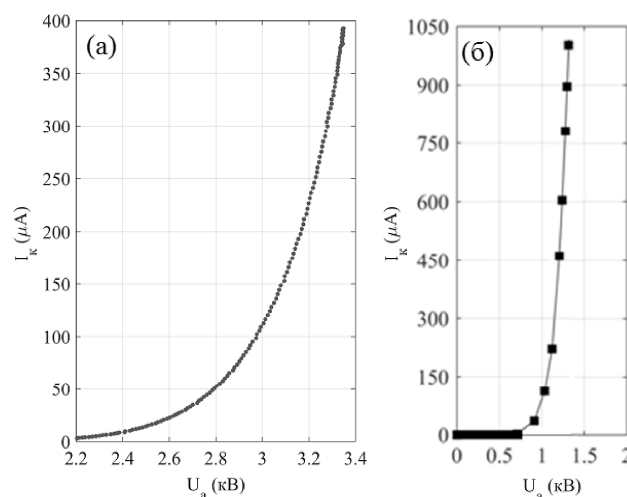


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики: (а) массива автоэмиссионных катодно-сеточных узлов с катодами острейного типа; (б) кремниевого автоэмиссионного катода лезвийного типа.

Выводы

В ходе проведенного исследования был разработан технологический маршрут изготовления кремниевого автоэмиссионного катода лезвийного типа и массива автоэмиссионных катодно-сеточных узлов с катодами острейного типа. Поверхность полученных экспериментальных образцов автоэмиссионных структур была исследована методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Получены вольт-амперные характеристики изготовленных образцов автоэмиссионных структур в результате проведения экспериментальных исследований эмиссионных свойств образцов на микрометровом масштабе. Полученные результаты могут быть использованы при создании автоэмиссионных структур, применяемых в качестве основы элементной базы и приборов высокочастотной электроники ГГц диапазона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке финансовой поддержке Гранта Президента РФ (идентификационный номер 075-15-2019-1139) с использованием оборудования ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база", поддержанного Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grigorev A.D. Terahertz Electronics – Cambridge Scholars Publishing, 2020.
2. N. P. Lockwood et al., 1.5: Development of field emission cathodes, electron gun and a slow wave structure for a terahertz traveling wave tube // 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), – Monterey, USA, pp. 25-26, 2010.
3. D. R. Whaley et al., 100 W Operation of a Cold Cathode TWT // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 56, no. 5, pp. 896-905, May 2009.
4. Basu A. et al., A portable x-ray source with a nanostructured Pt-coated silicon field emission cathode for absorption imaging of low-Z materials // Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 48, no. 22. p. 225501, 2015.
5. Shesterkin V.I., Operating Emission Characteristics of Various Types of Field-Emission Cathodes // Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 1–26, 2020.
6. Li Y., Sun Y., Yeow J.T.W. Nanotube field electron emission: principles, development, and applications // Nanotechnology, vol. 26, no. 24, p. 242001, 2015.
7. Laszczyk, K.U. Field Emission Cathodes to Form an Electron Beam Prepared from Carbon Nanotube Suspensions // Micromachines, vol. 3, no. 11, p. 260, 2020.
8. Jung S.M., et al., Clean Carbon Nanotube Field Emitters Aligned Horizontally // Nano Letters, vol.7, no. 6, pp. 1569-1573, 2006.
9. Marcus R.B., et al., Formation of silicon tips with <1 nm radius // Applied Physics Letters, vol. 56, no. 3, p. 236, 1990.