

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XIII Международного
симпозиума**

11–14 марта 2019 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Современное состояние элементной базы вакуумной нанозлектроники

Н.А. Дюжев^{1,*}, И.Д. Евсиков^{1,§}

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина,1, Москва, Зеленоград, 124498.

*djuzhev@ntc-nmst.ru, §evsikov.ilija@yandex.ru

В данной работе обсуждается современное состояние и перспективы развития устройств вакуумной нанозлектроники, базовым элементом которых является объемная автоэмиссионная структура с острым или лезвийным катодом, управляющим электродом-сеткой и анодом, размещенными на нанометровых расстояниях. Приведены проблемы связанные с созданием и эксплуатацией автоэмиссионных структур, рассматриваются возможные подходы к их решению.

Введение

Вакуумная электроника была одним из двигателей промышленного прогресса за последние 100 лет. Развитие концепций вакуумной электроники происходило под влиянием технологических циклов, начиная с изобретения ламп накаливания и заканчивая электронно-лучевыми трубками. Несмотря на то, что первые устройства данной отрасли считаются устаревшими, сама вакуумная электроника жива и существует в виде микроволновых трубок, рентгеновских трубок, электронно-лучевых приборов для анализа и обработки материалов, а вакуумная микро- и нанозлектроника продолжает активно развиваться.

Первый виток развития интегральной вакуумной электроники произошел в 1968 году. Кеннет Шоулдерс предложил концепцию нового устройства, которое представляло собой миниатюрный вакуумный триод. Основное отличие устройства Шоулдерса от транзистора состояло в том, что проводящей средой для носителей заряда являлся вакуум, что в свою очередь положительно сказывалось на быстродействии устройства и его стойкости к экстремальным условиям высокой температуры и радиации. В том же году Шоулдерс представил первую тонкопленочную автоэмиссионную структуру, основанную на разработках своего коллеги Чарльза Спиндта [1]. Данная структура состояла из острого молибденового конуса (катода), расположенного под отверстием диаметром 1,5 мкм в пленочном молибденовом управляющем электроде (сетке). Малый радиус скругления вершины катода позволил получить эмиссию при управляющем напряжении 200 В. Применение фотолитографии позволило получить высокую плотность размеще-

ния катодов, и как результат, достичь высокой плотности эмиссионного тока, которая составляла 10 А/см². В СССР аналогичные структуры создавались с использованием пленочных катодов. Однако на этом этапе развития вакуумной электроники разработки были прекращены из-за высоких рабочих напряжений и малых сроков службы устройств, которые были связаны с микронными технологическими нормами структур.

Второй виток развития интегральной вакуумной электроники был в середине 80-ых годов, когда французская фирма LETI, японская фирма Futaba, а также отечественные организации Исток (г. Фрязино) и ОКБ ПУЛ (г. Саратов), совместно с НИИФП им. Ф. В. Лукина, начали разработку плоских автоэмиссионных дисплеев на базе автоэмиссионных матриц. Такие дисплеи имели важные преимущества — высокую световую эффективность и широкий диапазон рабочих температур. Дисплеи данного типа планировалось использовать в военной и космической технике, бытовой электронике. Однако разработки были свернуты через несколько лет в связи с активным продвижением технологии жидкокристаллических дисплеев. В 1988 году на волне разработок плоских автоэмиссионных дисплеев в Соединенных Штатах была созвана ежегодная международная конференция International Vacuum Microelectronics Conference [2].

Современная вакуумная нанозлектроника

В настоящее время в связи с развитием нанозлектроники начинается третий этап развития вакуумной электроники — вакуумная нанозлектроника, что проявилось в изменении названия междуна-

ной конференции — International Vacuum Nanoelectronics Conference [3].

Устройства, основанные на автоэмиссионных структурах, остаются перспективным вариантом развития вакуумной нанозлектроники. Современный уровень развития технологии фотолитографии позволяет создавать структуры с существенно меньшими размерами (вплоть до 10 нм) и соответственно меньшими рабочими напряжениями (менее 15 В). Однако производство и эксплуатация устройств данного типа сопряжены с рядом серьезных проблем. В их число входят: определенная технологическая сложность изготовления эмиттерной матрицы; процессы адсорбции и десорбции, возникающие при автоэмиссии; деформация эмиттеров под действием разогрева; возникновение плазмы в пространстве между эмиттером и анодом; низкая стабильность токовых характеристик во времени.

Сложность технологического процесса создания металлических автоэмиссионных структур Спиндта затрудняет переход к массовому производству таких устройств. Выходом из этой ситуации может стать применение операций кремниевой КМОП технологии, вследствие ее высокой воспроизводимости и широкого распространения в современной электронике. В то же время, кремний имеет недостаточную тугоплавкость и механическую прочность, свойства, которые имеют решающее значение для стабильности выходных характеристик устройства [4].

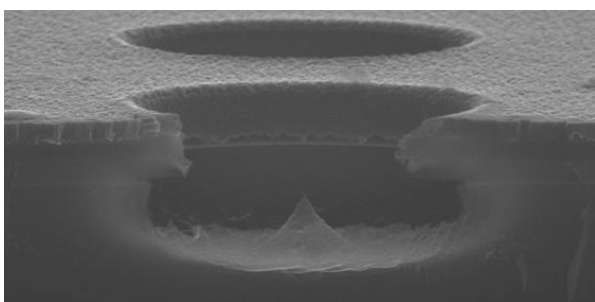


Рис. 1. Поперечный разрез кремниевой автоэмиссионной матрицы

Существует два пути разрешения проблемы деформации кремневых катодов под действием разогрева в процессе автоэмиссии. Первый — применение технологического процесса, при котором катод покрывается тонким слоем материала с высокой теплопроводностью, тугоплавкостью и пределом прочности, например слоем карбида кремния

или алмаза. Второй способ — это изначальный отказ от использования кремния при изготовлении устройств в пользу материалов с вышеуказанными свойствами.

Решением проблемы процессов адсорбции и десорбции остаточного газа может стать предварительный подогрев эмиттеров. Небольшой нагрев должен привести к удалению продуктов адсорбции и десорбции. Изготовление устройств из материалов, обладающих химической инертностью, также может помочь в устранении данных негативных эффектов.

Устранить возникновение плазмы возможно применением прочных материалов (вышеупомянутые алмаз, карбид кремния), так как в процессе автоэмиссии сильное электрическое поле может отрывать микрочастицы эмиттеров, а поток электронов в свою очередь ионизировать молекулы материала эмиттера, что приводит к появлению плазмы. Кроме того, оказать положительное влияние может уменьшение рабочих напряжений устройства, что в свою очередь уменьшает вероятность ионизации молекул газа окружающей среды и материала катода, что потребует, однако, уменьшения расстояния между катодом и анодом.

Стабильность токовых характеристик во времени — это комплексная проблема, которая может быть решена устранением процессов сопутствующих автоэмиссии, т.е. упомянутых выше эффектов возникновения плазмы, термической деформации эмиттеров, адсорбции и десорбции.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 14.578.21.0250, RFMEFI57817X0250) с использованием оборудования ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база", поддержанного Минобрнауки России.

Литература

1. Spindt C. A., J. Appl. Phys.0021-8979 39, 3504 (1968).
2. First International Vacuum Microelectronics Conference, Williamsburg, VA, USA (1988).
3. 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference, Kyoto, Japan (2018).
4. Дюжев Н., Тишин Ю., ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 1, 50-53 (2001).