

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, В. И. ГОЛОТА, к. т. н. И. Т. КОГУТ

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»;
г. Ивано-Франковск, Прикарпатский НУ
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
16.04 2007 г.

Оппонент к. т. н. П. В. ПАЩЕНКО
(НИИ ЯФ, г. Москва)

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВТОЭМИССИОННЫХ КРЕМНИЕВЫХ КАТОДОВ СУБМИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ

Предложен практический способ формирования элементов субмикронных размеров с использованием совмещения с базовыми знаками стандартной проекционной литографии, предварительно созданными на этапе “нулевой” фотолитографии.

За последнее десятилетие возросло количество публикаций по устройствам на основе автоэмиссионной вакуумной микроэлектроники. Такие микроэлектронные устройства могут использоваться в плоских экранах телевизоров и компьютеров [1], а также в безмасочной фотолитографии как альтернативной по отношению к проекционной литографии при производстве интегральных схем [2—4]. В безмасочной фотолитографии вместо маски используется кремниевая пластина с матрицами автоэмиссионных катодов субмикронных размеров. Работой таких катодов управляют с использованием САПР файлов, которые содержат послынную топологическую информацию об интегральной схеме. Разрешающая способность и производительность безмасочной фотолитографии в значительной степени определяется технологией изготовления как отдельных катодов с фокусирующими электродами, так и их матриц, монолитно интегрированных со схемами управления на одном кристалле.

Целью настоящей работы является разработка практического способа формирования топологических элементов субмикронных размеров; моделирование технологии изготовления кремниевых катодов с разной формой острий по КМОП-технологии с использованием фотошаблонов микронных размеров; двумерное моделирование электрического поля автоэмиссионного катода.

Анализ технологий изготовления автоэмиссионных катодов

Впервые технологию изготовления автоэмиссионных катодов разработал Спиндт [5]. Путем осаждения в вакууме был сформирован матричный автоэмиссионный катод с количеством острий до 5000 и плотностью упаковки $6,4 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$. При напряжениях 100—300 В эмиссионный ток с одного острия составлял 50—150 мкА в статическом режиме.

Кроме технологии осаждения в вакууме острий из тугоплавких металлов, сейчас разрабатываются технологии изготовления катодов из углеродных нанотрубок и полупроводников. Так, в [6] описан 10-этапный технологический процесс изготовления углеродных нанотрубок, интегрированных с молибденовыми фокусирующими электродами. На кремниевой подложке размерами $10 \times 10 \text{ мм}$ размещены углеродные нанотрубки с плотностью упаковки $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. При напряжениях 65—75 В получен эмиссионный ток одной нанотрубки в 50—500 нА в статическом режиме. Основным недостатком такого устройства — нестабильность геометрии и эмиссионного тока нанотрубок.

Первая запатентованная технология изготовления кремниевых катодов использовала обычные операции сухого травления кремния и окислительного заострения [7]. Она дает гладкую поверхность острий и малый радиус закругления вершин. В [8] кремниевые катоды заострялись и полировались бомбардировкой ионами Ag, после чего покрывались пленкой алмазоподобного углерода. Плотность упаковки составила $2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. При напряжениях 10—15 В ток эмиссии одного острия в статическом режиме составил 10 мкА. Однако при небольших отклонениях от диапазона рабочих напряжений, например 16 В, возникает пробой, и часть катодов разрушается.

В [9] предложен простой 5-этапный технологический процесс изготовления пирамидальных катодов. Используя круговые отверстия в фоторезисте, высокоэнергетической имплантацией BR_2 нарушают кремниевую решетку подложки, которая в дальнейшем служит маской для формирования профиля острий с помощью жидкостного химического анизотропного травления. Получена плотность упаковки примерно $1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$. При напряжениях 30—50 В ток эмиссии одного острия в статическом режиме составил 0,2—8 мкА. Основным недостатком такой технологии является зависимость размера апертур электродов от высоты эмиттеров.

Получение регулярных структур кремниевых катодов для низковольтных приложений с использованием интерференционного литографа предложено в [10]. Получена плотность упаковки $2,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. При напряжениях 13—21 В ток эмиссии одного острия в статическом режиме составил 1—30 мкА. При этом эмиссия получена при таких низких напряже-

ниях за счет уменьшения апертуры электродов до 70 нм и заострения вершин острий до радиуса 2 нм. Существенным недостатком технологии является повреждение до 50% острий в процессе химико-механического полирования поликремниевых электродов с вулканоподобным профилем.

Для фокусирования эмиссионных электронов в луч необходимого размера используются многоэлектродные электростатические линзы [11]. Так, линзы с четырьмя электродами позволяют сфокусировать электронный луч к диаметру 10 нм на расстоянии 100 мкм [6].

Автоэмиссионные катоды, изготовленные по современным технологиям, дают эмиссию электронов при напряжениях 30—60 В за счет использования экстракционных электродов с апертурой до 100 нм. Технологии с уникальным оборудованием позволяют получать размеры апертуры электродов менее 100 нм и за счет этого понизить напряжение эмиссии до 10—15 В. Несмотря на отличия, в них остаются актуальными задачи автофокусировки электронного луча, стабилизации эмиссионного тока и монолитной интеграции с системами управления на одном кристалле. Существенным недостатком рассмотренных технологий является также их ограниченность — возможность изготовления регулярных структур катодов только одинаковой формы и размеров.

Формирование элементов субмикронных размеров

Для изготовления автоэмиссионных катодов на поверхности кремниевой пластины необходимо сформировать регулярно расположенные маскирующие изображения фотолитографией с субмикронной разрешающей способностью. В [12] предложен простой способ формирования топологических элементов субмикронных размеров с помощью стандартной проекционной литографии. Реальные минимально возможные топологические размеры элементов в проекционной литографии определяются в основном длиной волны спектральной чувствительности фоторезистов и составляют 0,8—1,2 мкм, но точность совмещения для проекционной фотолитографии является достаточно высокой и составляет 40—100 нм. Этот параметр является определяющим при формировании субмикронных размеров элементов. Последовательность формирования таких элементов показана на рис. 1.

На кремниевую пластину осаждается пленка SiO_2 и наносится фоторезист. В результате экспозиции и первой проекционной фотолитографии $\Phi 1$ формируется пленочный топологический элемент с размером $L \geq 1$ мкм (рис. 1, а). После снятия первого фоторезиста и второй фотолитографии $\Phi 2$ пленка фоторезиста маскирует пленку SiO_2 на запроектированную величину размера топологического элемента $L < 1$ мкм (рис. 1, б). Совмещение на обеих стадиях проводится до одних базовых знаков совмещения проекционной фотолитографии, предварительно созданных на этапе так называемой «нулевой» фотолитографии. В результате последующей технологической операции сухого плазмохимического травления пленки SiO_2 получается пленка с размером $L < 1$ мкм,

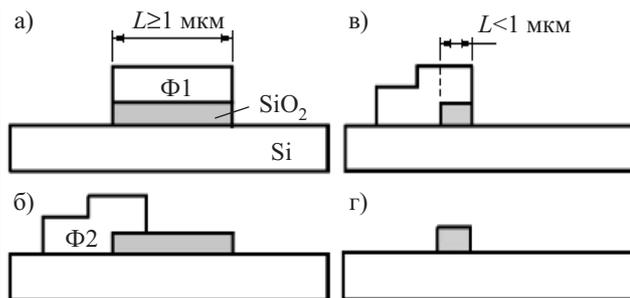


Рис. 1. Формирование элементов субмикронных размеров: а — фотолитография 1; б — фотолитография 2 с проектным смещением; в — травление SiO_2 ; г — травление фоторезиста

покрытая фоторезистом (рис. 1, в). Последней выполняется операция снятия фоторезиста (рис. 1, г).

Способ практически проверялся с использованием лазерно-рекристаллизованных структур кремний-на-изоляторе (КНИ) с толщиной кремниевой подложки 0,2 мкм, в которой формировались топологические элементы типа «затвор» МОП-транзистора, а также пленки SiO_2 толщиной 0,4 мкм, в которой формировались топологические элементы типа «окно». Были спроектированы наборы тестовых элементов с начальными размерами $L=1,6$ мкм для первой фотолитографии с использованием фотошаблонов стандартной проекционной фотолитографии с уменьшенным (10:1) изображением, а также наборы топологических тестовых элементов с разными величинами перекрытия фоторезистом вытравливаемых элементов с шагом 50 нм. В результате были получены топологические элементы субмикронных размеров в диапазоне 150—100 нм.

Таким образом, использование стандартной проекционной литографии позволяет стабильно получать топологические элементы субмикронных размеров.

Технология изготовления автоэмиссионных катодов субмикронных размеров

Используя вышеуказанный способ формирования элементов субмикронных размеров, промоделирована технология изготовления автоэмиссионных кремниевых катодов, которая представляет собой следующую последовательность базовых операций (рис. 2).

1. Осаждение пленки SiO_2 .
2. Фотолитография 1 и формирование маскирующих изображений (рис. 2, а).
3. Газовое химическое изотропное травление поверхности кремниевой пластины *n*-типа (100) для получения профиля острий (рис. 2, б).
4. Термическое окисление острий в среде O_2 .
5. Жидкостное химическое травление пленки SiO_2 для заострения кремниевых острий.
6. Осаждение на поверхность острий металла (W), хорошо сорбирующего газы (рис. 2, в).
7. Конформное осаждение на поверхность острий слоя SiO_2 .
8. Планаризация поверхности слоя SiO_2 (рис. 2, г).
9. Осаждение металла (Mo), стойкого к действию электронов.

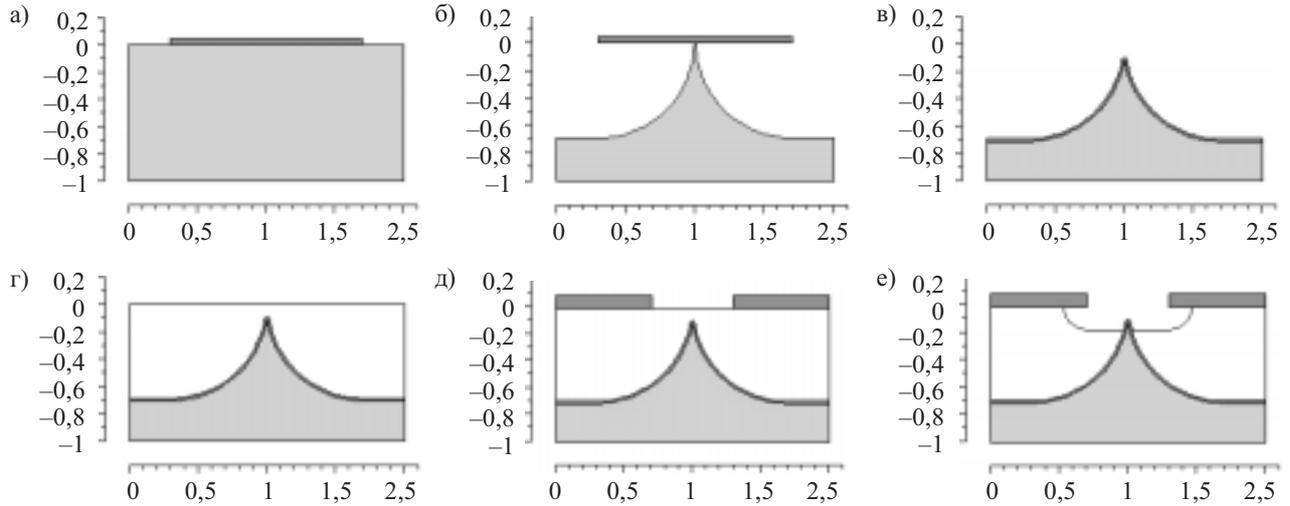


Рис. 2. Результаты моделирования последовательности изготовления автоэмиссионных катодов. Размеры по осям X и Y приведены в микрометрах

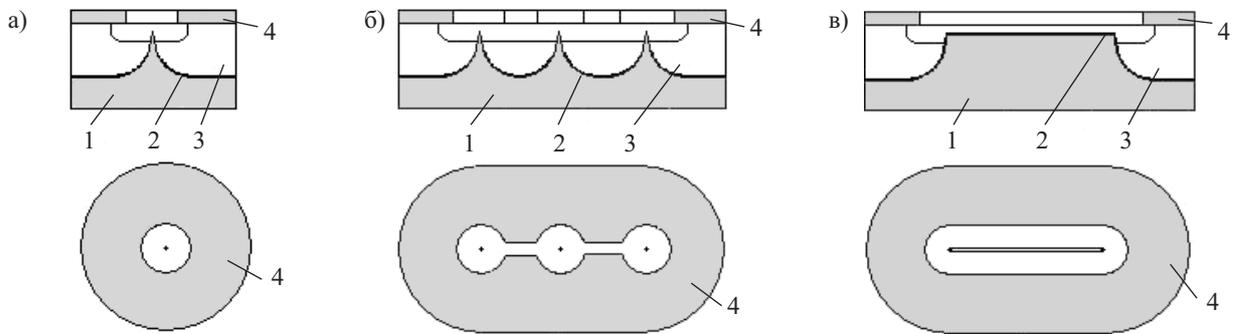


Рис. 3. Автоэмиссионные катоды разной формы:

a — одноострыйный; b — трехострыйный; c — лезвийный;

1 — кремниевая пластина; 2 — осажденная пленка W; 3 — слой SiO_2 ; 4 — экстракционный электрод из Mo

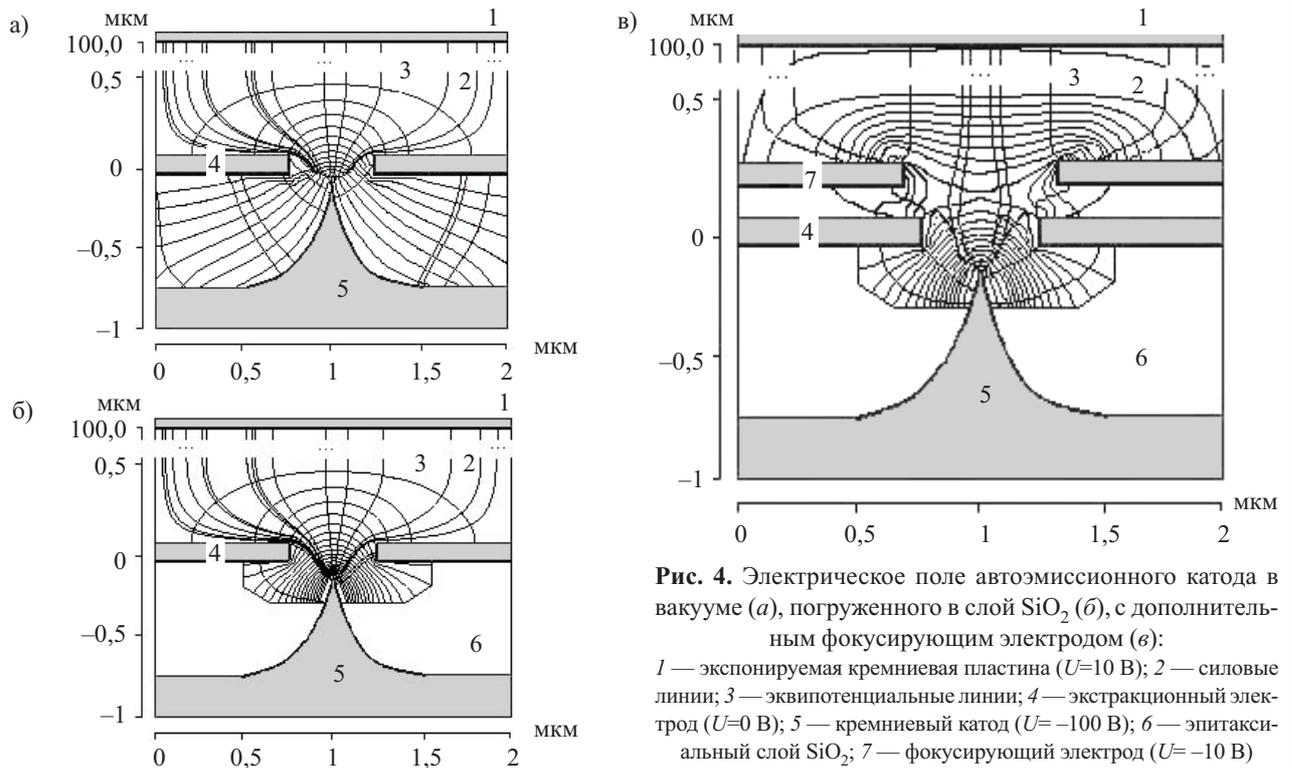


Рис. 4. Электрическое поле автоэмиссионного катода в вакууме (a), погруженного в слой SiO_2 (b), с дополнительным фокусирующим электродом (c):

1 — экспонируемая кремниевая пластина ($U=10$ В); 2 — силовые линии; 3 — эквипотенциальные линии; 4 — экстракционный электрод ($U=0$ В); 5 — кремниевый катод ($U=-100$ В); 6 — эпитаксиальный слой SiO_2 ; 7 — фокусирующий электрод ($U=-10$ В)

10. Фотолитография 2 и формирование апертур электродов (рис. 2, д).

11. Газовое химическое изотропное травление слоя SiO₂ на заданную глубину (рис. 2, е).

Используя разные наборы фотошаблонов, можно по одной технологии изготовить регулярные структуры с разной формой и размерами катодов: одноострийные, многоострийные и лезвийные. На рис. 3 показаны фронтальные и горизонтальные проекции одноострийных, трехострийных и лезвийных катодов.

Предложенная технология не использует самосовмещения электродов, приводящего к образованию вулканоподобных профилей. Это обеспечивает планарность электродов, возможность их расположения как выше, так и ниже катода, а также получение требуемых размеров апертур. Так, для показанных на рис. 2 геометрических форм катода и экстракционного электрода при разности потенциалов в 100 В создается напряженность электрического поля, достаточная для автоэлектронной эмиссии в вакууме 1,5·10⁻⁵ Па. Осаждение на поверхность острий металла, лучше сорбирующего газы по сравнению с кремнием, позволяет чистить ее периодическим импульсным нагревом, что способствует стабильности геометрической формы острий и эмиссионного тока, а также долговечности работы. Возможность формирования регулярных структур с разной формой и размерами катодов значительно расширяет область их применения.

Электрическое поле автоэмиссионного катода

На рис. 4 показаны результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов [13] электрического поля автоэмиссионного катода (поверхности, к которым приложен потенциал, отмечены жирной линией). Оригинальное погружение всего катода, кроме излучающей вершины, в слой SiO₂ препятствует эмиссии электронов с микронеровностей подножья острий, защищает от бомбардировки ионами и уменьшает площадь поверхности, сорбирующей газы. Планарное расположение экстракционного электрода формирует аксиально-симметричные эквипотенциальные линии и расходящиеся с вершины катода силовые линии. Для экспонирования кремниевой пластины электронным лучом необходимы сходящиеся силовые линии электрического поля. Сходящиеся силовые линии можно получить с помощью дополнительного фокусирующего электрода.

Заключение

Предложен практический способ формирования элементов субмикронных размеров с использованием совмещения с базовыми знаками стандартной

проекционной литографии, предварительно созданными на этапе так называемой “нулевой” фотолитографии. Получена модель технологии изготовления автоэмиссионных кремниевых катодов субмикронных размеров с планарно расположенными электродами и погруженными в слой SiO₂ подножьями катодов. Использование различных наборов фотошаблонов позволяет по одной технологии получать регулярные структуры катодов разной формы и размеров: одноострийные, многоострийные и лезвийные.

По результатам двухмерного моделирования электрического поля при заданных напряжениях катода, электродов и анода показано, что дополнительный фокусирующий электрод формирует сходящиеся силовые линии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Tcherepanov A. Y., Chakhovskoi A. G., Sharov V. B. Flat panel display using low-voltage carbon field emitters // J. of Vac. Sci. and Technol.— 1995.— Vol. B13(2).— P. 482—486.
2. Алферов Ж. Полупроводниковая электроника в России. Состояние и перспективы развития // Электроника: НТБ.— 2005.— № 4.— С. 5—9.
3. Ware P. Removing the mask // The SPIE Magazine of Photonics and Applications.— 2002.— Vol. 2 (3).— P. 26—27.
4. Голота В. И., Дружинин А. О., Когут И. Т. Сучасний стан і напрямки досліджень нанометрової літографії // Вісник НУ “ЛП” Сер. Електроніка.— 2006.— № 423.— С. 76—80.
5. Spindt C. A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E. R. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // J. Appl. Phys.— 1976.— Vol. 47 (12).— P. 5248—5263.
6. Bailor L. R., Lowndes D. H., Simpson M. L. et al. Digital electrostatic electron-beam array lithography // J. of Vac. Sci. and Technol.— 2002.— Vol. B 20(6).— P. 2646—2650.
7. Pat. 3970887 USA. Micro-structure field emission electron source / D. O. Smith, J. S. Judge, M. Trongello, P. R. Thronton.— 1976.
8. Lee Sanjo, Lee Sunnup, Lee Sungwoon, Leon D. Self-aligned silicon tips coated with diamond like carbon // J. of Vac. Sci. and Technol.— 1997.— Vol. B 15(2).— P. 457—459.
9. Takashi Tani, Satoru Fujita, Yoshitery Numao et al. A novel process for fabrication of gated silicon field emitter array taking advantage of ion beam bombardment retarded etching // Japanese Journal of Applied Physics.— 2005.— Vol. 44, N 7A.— P. 5191—5192.
10. Pflug D., Scattenburg M., Smith H., Akinwande A. Field emitter array for low voltage application with sub 100 nm apertures and 200 nm period // IEEE Intern. Electron Device Meeting. Technical digest.— Washington, DC.— 2001.— P. 851—854.
11. Dvorson L., Kymissis I., Akinwande A. I. Double-gated silicon field emitter // J. of Vac. Sci. and Technol.— 2003.— Vol. B 21(1).— P. 486—494.
12. Пат. 18536 України. Спосіб формування топологічних зображень мікроелектронних пристроїв / І. Т. Когут, А. О. Дружинин, В. І. Голота.— 2007.— Бюл. № 11.
13. Зенкевич О. Методы конечных элементов в технике.— М.: Мир, 1975.