

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

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

Дата поступления в редакцию
27.07 2009 г.

Оппонент Л. Ф. КОВАЛЕНКО
(НИИ «Гелий», г. Винница)

МАТРИЧНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ МИКРОКАТОДЫ ДЛЯ АВТОЭМИССИОННЫХ ДИСПЛЕЕВ

Проведен обзор существующих и перспективных типов плоских дисплеев. Предложены матричные кремниевые микрокатоды для автоэмиссионных дисплеев, разработана последовательность базовых операций их изготовления.

Автоэмиссионные дисплеи имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с существующими плоскими дисплеями, особенно в бортовых устройствах и комплексах. Однако время их жизни значительно меньше, чем требуется для устройств отображения информации (не менее 60 тыс. часов), что ограничивает область их применения. Критическими элементами, определяющими время жизни автоэмиссионных дисплеев, являются эмиссионные элементы. Поэтому исследования по разработке новых материалов и конструкций эмиссионных элементов являются актуальными.

В работе рассмотрена возможность использования в качестве эмиссионных элементов матричных кремниевых микрокатодов, сформированных на пластине «кремний-на-изоляторе» (КНИ).

Обзор существующих типов дисплеев

Информационные дисплеи являются связующим звеном между пользователем и электронными системами. Наибольшее распространение имели дисплеи с электронно-лучевыми трубками, на смену которым пришли плоские жидкокристаллические и газоразрядные дисплеи.

В жидкокристаллических (ЖК) дисплеях используется явление поляризации светового потока [1]. ЖК-экран образован матрицей ячеек с жидкими кристаллами (цианофенила), расположенной между двумя прозрачными электродами и двумя поляризационными фильтрами, плоскости которых перпендикулярны. На поверхности электродов, которые контактируют с жидкими кристаллами, имеются продольные параллельные канавки для задания начальной ориентации молекул. Направление канавок выбирается так, чтобы на поверхности обоих электродов они были взаимоперпендикулярны, поэтому молекулы в отсутствие электрического поля выстраиваются в винтовую структуру. Такая структура поворачивает плоскость поляризации, и свет проходит через нее без потерь. При приложении напряжения к электродам

молекулы выстраиваются вдоль поля, что нарушает винтовую структуру и приводит к непрозрачности ячейки.

Для увеличения угла обзора и уменьшения времени отклика ЖК-дисплеев разработаны специальные технологии: IPS (in-plane-switching), VA (vertical alignment), DSTN (double super twist nematic), α -Si, poly-Si TFT (amorphous, poly-Silicon thin film transistor). В активно-матричной TFT-технологии используются коммутационные тонкопленочные транзисторы, которые управляют состоянием субпикселей.

ЖК-дисплеи имеют небольшой вес и толщину, в них отсутствует мерцание экрана, однако они имеют также и ряд принципиальных недостатков: четкое изображение можно получить только при штатной разрешающей способности, малы цветная палитра, точность цветопередачи и скорость смены изображений, контраст зависит от угла обзора.

В газоразрядных (ГР) дисплеях используется явление электрического разряда в газе, которое сопровождается свечением люминофора [1]. ГР-экран представляет собой матрицу ячеек, наполненных неоновом или ксеноном, которая размещена между прозрачным электродом на внешней стороне и адресными электродами на внутренней стороне экрана. При приложении высокого напряжения к электродам в ячейках образуется и перемещается плазма, излучающая ультрафиолетовые лучи, которые попадают на люминофор и инициируют его видимое свечение. Люминофоры излучают один из основных цветов: красный, зеленый или синий.

При создании ГР-дисплеев возникает ряд проблем. Первая из них — это размер и количество пикселей. Один пиксел состоит из трех субпикселей размера 200×200×100 мкм. На газоразрядном экране с разрешающей способностью 1280×768 пикселей необходимо разместить до 3 млн. субпикселей. Другая проблема в том, что передний электрод должен быть прозрачным. С этой целью используется оксид индий-олова. Однако при протекании большого тока на сопротивлении проводников падает напряжение, что уменьшает и искажает сигнал. Поэтому необходимо добавлять промежуточные соединительные проводники из хрома, который непрозрачен.

Возможной альтернативой ЖК- и ГР-дисплеям в недалеком будущем могут стать дисплеи с органи-

ческими светоизлучающими диодами (OLED) [2], поверхностно-проводящие электронно-эмитирующие дисплеи (SED) и автоэмиссионные дисплеи (FED) [3—5].

В дисплее с органическими светоизлучающими диодами (ОСД) матрица пикселей образована многослойной тонкопленочной структурой на основе полимеров [2]. Полимеры наносятся рядами и столбцами на подложку. Полученные на пересечениях рядов и столбцов пиксели при прохождении через них тока могут излучать свет разных цветов. Важным преимуществом ОСД-дисплеев по сравнению с жидкокристаллическими является отсутствие подсветки со стороны подложки. Поэтому ОСД-дисплеи потребляют значительно меньше энергии и также могут быть гибкими. Основная проблема ОСД-дисплеев заключается в том, что «синие» светоизлучающие диоды имеют значительно меньшее время жизни по сравнению с красными и зелеными. Время жизни «синих» диодов составляет 14 тыс. часов, что значительно меньше времени жизни ЖК- и ГР-дисплеев, которое составляет примерно 60 тыс. часов.

В эмиссионных дисплеях используются микрокатоды разных конструкций. В зависимости от расположения микроатода и модулирующего электрода относительно анода их разделяют на вертикальные (с прямым и обратным расположением модулятора) и латеральные (катод и модулятор параллельны друг другу и перпендикулярны плоскости анода) [3]. У вертикальных микрокатодов с прямым расположением модулятора (катод–модулятор–анод) почти все электроны попадают в анодную плоскость (за исключением токов утечки). В латеральных микрокатодах только 1—3% электронов попадает в анодную плоскость. К вертикальным относятся микрокатоды Спиндта с вертикально расположенными нанотрубоподобными структурами, полученные методом нанопечати. К латеральным относятся микрокатоды конструкции «металл–изолятор–металл», поверхностно-проводящие электронно-эмитирующие, электронно-баллистические [4].

Поверхностно-проводящие электронно-эмитирующие (ППЭЭ) дисплеи имеют матрицу пикселей, которая размещена между двумя стеклянными пластинами в вакууме с давлением остаточных газов

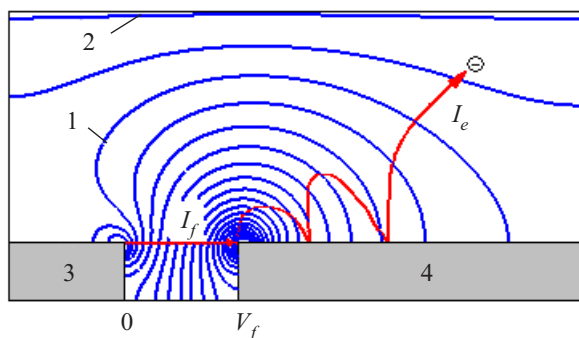


Рис. 1. ППЭЭ-дисплей:

1 — эквипотенциальные линии; 2 — высоковольтный анод с нанесенным люминофором; 3 — заземленный электрод; 4 — низковольтный электрод

10^{-6} торр [5]. На внешнюю пластину нанесена пленка прозрачного анода и люминофор, как показано на рис. 1.

На внутренней пластине сформированы эмиттеры электронов. Эмиттер представляет собой два металлических электрода 3 и 4 с щелью между ними размером в десятки нанометров. К электроду 4 прикладывается напряжение, необходимое для эмиссии электронов. Плотность эмиссионного тока в щели I_f описывается уравнением Фаулера–Нордгейма. Эмитированные электроны захватываются электрическим полем электрода 4, ударяются в него и поглощаются с выделением тепла или рассеиваются. При этом возможен процесс многократного рассеивания электронов. Рассеянные электроны захватываются электрическим полем анода и ускоряются по направлению к соответствующей области с люминофором, инициируя излучение красного, зеленого или синего света.

Для понижения напряжения на электроде 3 (рис. 1) уменьшают размер щели (рис. 2) до 5 нм путем парохимического осаждения графита с одновременной электрической активацией эмиттера. Основным недостатком ППЭЭ-дисплеев является сложная технология получения наноразмерной щели, а также небольшое число электронов, которые попадают на анод с нанесенным люминофором (соотношение токов $I_e/I_f=0,03$).

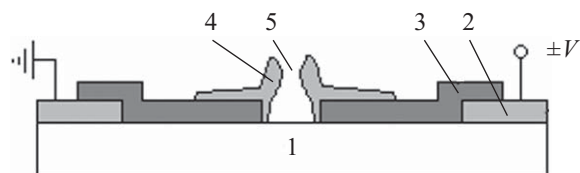


Рис. 2. Эмиссионные электроды с уменьшенной щелью: 1 — подложка; 2 — Pt-электрод; 3 — PdO-пленка; 4 — графитовая пленка; 5 — щель

Автоэмиссионные (АЭ) дисплеи объединяют технологию дисплеев с электронно-лучевыми трубками (катод–анод–люминофор) с ячеистой конструкцией ЖК-дисплеев [6]. В АЭ-дисплеях матрица автоэмиссионных микрокатодов с электродами располагается на внутренней подложке. На внешней стеклянной пластине нанесены прозрачные анодные и люминофорные элементы. При значениях напряжения на электродах, которые создают напряженность поля на остриях микрокатодов в интервале $(2—5) \cdot 10^7$ В/см, начинается автоэмиссия электронов. Эмитированные электроны ускоряются в вакуумном пространстве и ударяются в красный, зеленый или синий люминофор. Управление микрокатодами осуществляется с помощью матрично-адресной схемы.

АЭ-дисплеи имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами дисплеев: безынерционность, вибрационную стойкость, отсутствие подсветки, высокий уровень контраста, рабочий диапазон температуры от -40 до $+70^\circ\text{C}$. Поскольку свет излучается каждым пикселом по отдельности, потребление энергии зависит от отображаемой на дисплее информации. Люминофор располагается на верхней панели пиксельной ячейки, что увеличивает угол обзора до

160°. Дисплеи могут работать по стандарту HDTV, т. к. их разрешение 1920×1080. Однако они имеют и существенные недостатки: нестабильную автоэмиссию, небольшое время жизни. Так как дисплеи изготавливаются по технологиям вакуумной и полупроводниковой микроэлектроники, нужна прочная конструкция экрана с вакуумом в междуэлектродном пространстве не менее 10^{-6} торр. Кроме того, необходимы материалы, стойкие к распылению при бомбардировке ионами в вакууме.

Структура пиксельных ячеек АЭ-дисплеев

В зависимости от величины анодного напряжения разработаны конструкции высоко- и низковольтных АЭ-дисплеев. Структура пиксельных ячеек таких АЭ-дисплеев показана на рис. 3. Высоковольтные дисплеи имеют анодное напряжение в интервале 5—10 кВ и используют люминофоры группы фосфоров P22 с ZnS:Ag, Cl (синий), ZnS:Cu, Au, Cl (зеленый), Y₂O₅S:Eu (красный), как и в дисплеях с электронно-лучевыми трубками [7, 8]. Люминофоры располагаются в светопоглощающей матрице, что устраняет взаимное подсвечивание. Прочность конструкции с междуэлектродным вакуумным пространством обеспечивается прозрачными диэлектрическими подпорками [9]. Для предотвращения электрического пробоя подпорок их высоту увеличивают до 1 мм (рис. 3, а), однако при этом уменьшается разрешающая способность, т. к.

увеличивается размер области в анодной плоскости, экспонируемой электронным пучком 5. Тонкий слой алюминия 10 отражает свет люминофоров, который излучается внутрь дисплея.

В низковольтных АЭ-дисплеях (рис. 3, б) анодное напряжение не превышает 500 В, поэтому в качестве люминофоров используются низковольтные фосфоры, например YAG:Eu (красный), YAG:Tb (зеленый), Y₂SiO₅:Ce (синий), где YAG — иттрий-алюминиевый гранат [10, 11]. Так как электроны имеют небольшую энергию, алюминиевый слой с внутренней стороны люминофоров удален, а прозрачный и проводящий слой оксида индий-олова расположен с внешней стороны люминофоров. Оксид индий-олова имеет меньшую проводимость по сравнению с алюминием, поэтому в люминофорах собирается заряд, который уменьшает их время жизни. Низковольтные люминофоры менее эффективны, т. к. часть низкоэнергетических электронов рекомбинирует в поверхностных слоях без излучения света.

Материалы для микрокатодов АЭ-дисплеев

Детальный обзор материалов для разных элементов АЭ-дисплеев сделан в [12, 13]. Основными элементами, определяющими время жизни АЭ-дисплеев, являются автоэмиссионные микрокатоды, которые должны обеспечивать плотность тока 10—100 мА/см² для яркого свечения люминофоров. Микрокатоды сначала изготавливали из молибдена [14], потом стали использовать полупроводники, алмаз, гафний, гексаборид лантана и другие материалы с небольшим значением работы выхода электрона. Для увеличения стабильности автоэмиссии и времени жизни микрокатодов разрабатываются алмазоподобные углероды, композитные, тонкопленочные, графеновые, нанокатодные и другие наноразмерные материалы [13].

Однако использование указанных материалов не решает полностью проблемы стабилизации эмиссии и значительного увеличения времени жизни микрокатодов. Стабильную автоэмиссию микрокатодов получают при последовательном их соединении с диодами и МОП-транзисторами [15], а для увеличения времени жизни исследуются возможности замены микрокатодов матрицами нанотрубок [16], нанопоясов [17], наноиглол [18], нанопроволоки и нитевидных кристаллов [19]. Одним из перспективных материалов для нанокатодов являются нитевидные кристаллы кремния [20], т. к. технология их изготовления совместима с КМОП-технологией.

Нитевидные кристаллы кремния получают парожидкостным выращиванием [21, 22], химическим осаждением из паровой фазы, молекулярно-лучевой эпитаксией [23], электронно-лучевым быстрым тепловым отжигом [24]. Фотография кремниевых нитевидных кристаллов, выращенных на кремниевой подложке с ориентацией <111> методом молекулярно-лучевой эпитаксии, полученная сканирующим электронным микроскопом, показана на рис. 4. В качестве «затравок» использованы кластеры золота, кристаллы выращены при температуре 525°С за 120 мин.

Наиболее простым методом получения нитевидных кристаллов на поверхности кремния является

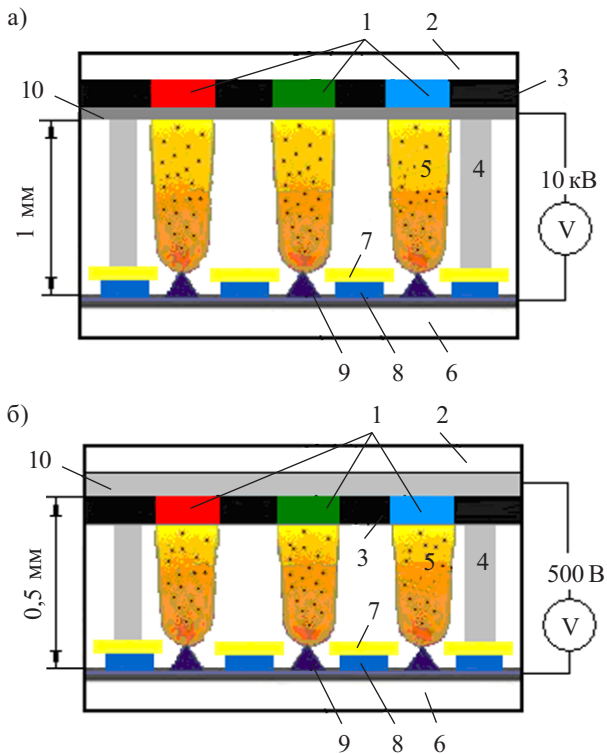


Рис. 3. Структура пиксельной ячейки высоковольтного (а) и низковольтного (б) АЭ-дисплеев:
 1 — люминофор (красный, зеленый, синий); 2 — стекло; 3 — светопоглощающая матрица; 4 — подпорка-изолятор; 5 — пучок эмитированных электронов; 6 — подложка; 7 — модулирующий (экстракционный) электрод; 8 — подэлектродный изолятор; 9 — микрокатод; 10 — слой алюминия (а) или прозрачный слой оксида InSn (б)

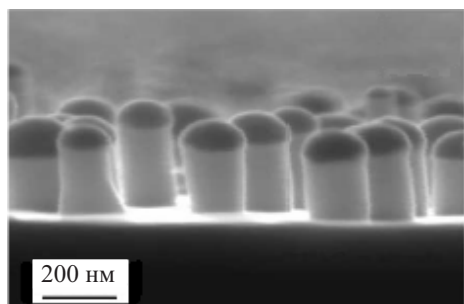


Рис. 4. Кремниевые нитевидные кристаллы, полученные электронно-лучевой эпитаксией

электронно-лучевой быстрый тепловой отжиг. При комнатной температуре на поверхности кремниевой пластины образуется естественный слой оксида кремния толщиной 2,5 нм. При низких парциальных давлениях O_2 и высокой температуре происходит процесс термической деоксидации слоя SiO_2 за счет двух реакций: $2Si + O_2 \rightarrow 2SiO$ и $Si + SiO_2 \rightarrow 2SiO$ [25]. Первая реакция происходит при взаимодействии мобильных мономеров кремния с молекулами кислорода. В результате стравливается кремний и образуется газ SiO , при улечивании которого через слой оксида кремния образуются наноразмерные поры. В результате второй реакции стравливается и кремний, и оксид, при этом формируются новые поры и расширяются существующие по всей поверхности пластины.

Кинетика образования и расширения пор является важной частью первого механизма роста наноразмерных нитевидных кристаллов на освобожденной от оксида поверхности кремния. Для диффузии мобильных мономеров кремния на идеальной поверхности $Si(100)$ как вдоль, так и поперек рядов димеров нужна энергия активации меньше 1 эВ. Диффузионные атомы кремния образуются как при нагреве, так и в процессе электронно-стимулированной десорбции. При энергии активации 0,7 эВ атомы кремния перемещаются вверх по ступенькам атомных слоев, формируя нитевидные кристаллы, а при энергии 1,1 эВ — перемещаются вниз, увеличивая размеры наноразмерных островков [26]. Изменяя температуру отжига, можно управлять энергией активации. При большей температуре отжига вырастают большие наноразмерные островки, однако плотность их расположения на поверхности меньше.

Другим механизмом роста наноразмерных нитевидных кристаллов является ступенчатое понижение температуры после отжига. При быстром охлаждении концентрация адатомов превышает концентрацию насыщения, что приводит к плотному ядрообразованию и малым размерам ядер. При медленном охлаждении происходит разреженное ядрообразование, но с ядрами больших размеров. На рис. 5 показана полученная на атомно-силовом микроскопе [26] фотография участка (размером 4×2 мкм) подложки $Si(111)$ *p*-типа проводимости с кремниевыми нитевидными кристаллами. Кристаллы высотой 12—21 нм выращены при температуре отжига $1100^\circ C$, продолжительности 3 с и скорости охлаждения $4^\circ C/s$. Получена плотность наноструктур 30 мкм^{-2} .

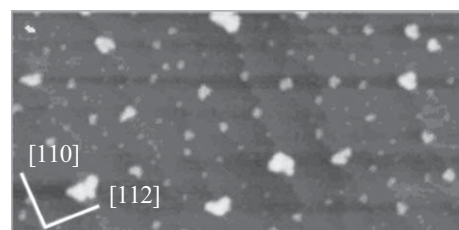


Рис. 5. Кремниевые нитевидные кристаллы, полученные электронно-лучевым быстрым тепловым отжигом

Существенным недостатком кремниевых нитевидных кристаллов является нерегулярность их расположения на поверхности пластины, а также недостаточная высота, что приводит к быстрому разрушению наноструктур под воздействием внешних факторов.

Значительно большее время жизни, порядка тысяч часов в вакууме с давлением остаточных газов около 10^{-6} торр, имеют пучки углеродных волокон, полученных пиролизом полиакрилонитрильных нитей. Такие нити помещают в стеклянный капилляр (рис. 6) и для улучшения автоэмиссионных характеристик обрабатывают плазмохимическим травлением [27, 28].

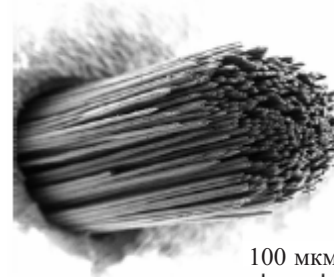


Рис. 6. Автоэмиссионный микрокатод, образованный пучком углеродных волокон

Автоэмиссионный ток 200—500 мкА получен у катода на основе пучка (300—400 шт.) углеродных волокон диаметром около 7 мкм. Такие микрокатоды являются перспективными для использования в АЭ-дисплеях, т. к. они соразмерны по площади с субпикселями. Однако отбор волокон необходимой длины и помещение их заданного количества в капилляры для сотен тысяч микрокатодов, а также несовместимость их изготовления с КМОП-технологией является существенным недостатком.

Изготовление матриц кремниевых микрокатодов

Одним из способов увеличения продолжительности жизни микрокатодов является увеличение их количества при заданном токе автоэмиссии. Микрокатоды, изготовленные изотропным травлением кремниевой пластины, имеют высокую повторяемость геометрических размеров и электрофизических характеристик, поэтому их можно использовать в качестве эмиссионных элементов АЭ-дисплеев. При изготовлении таких микрокатодов на КНИ-пластине их можно разделить на изолированные матрицы необходи-

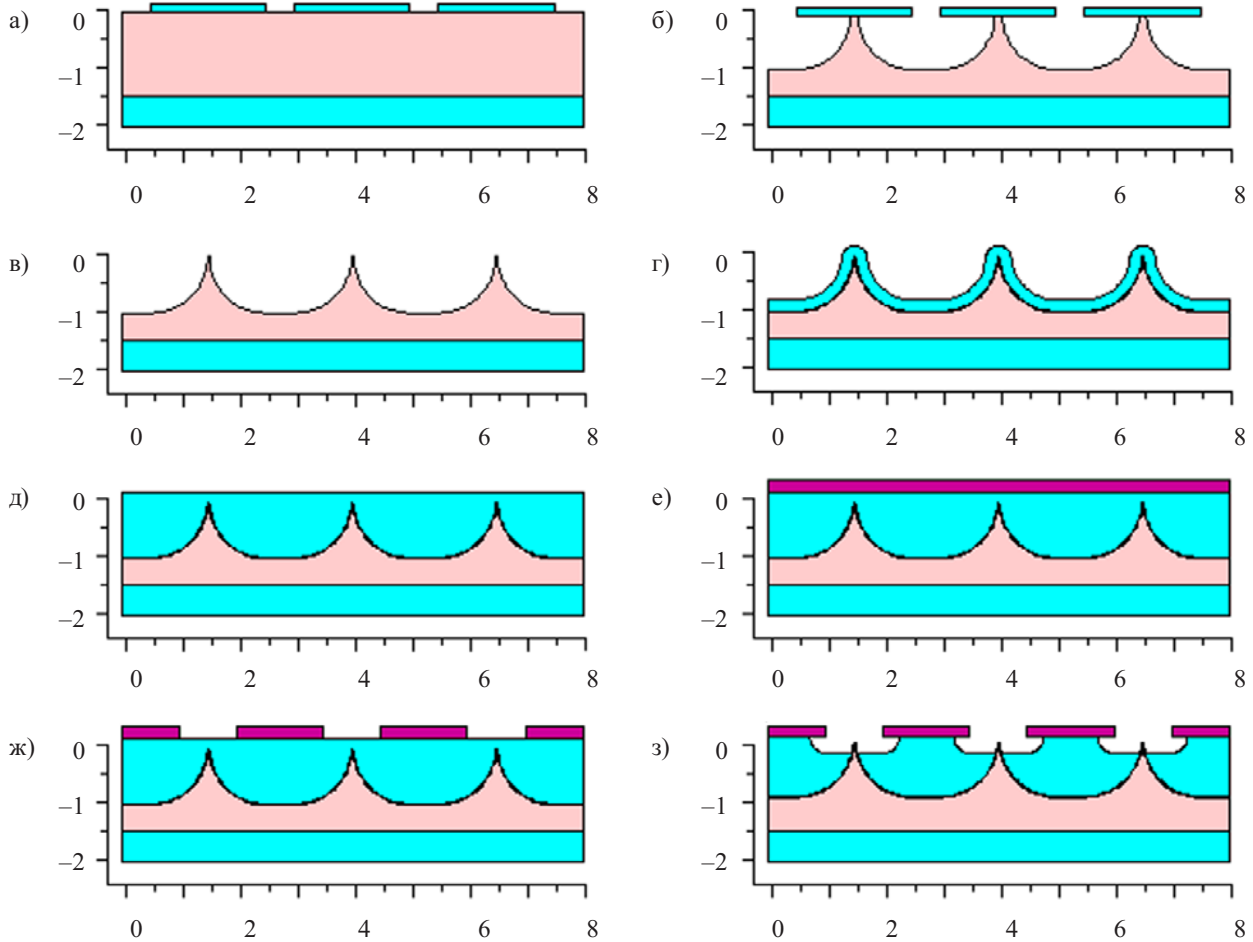


Рис. 7. Последовательность базовых операций изготовления микрокатодов на КНИ-пластине (на осях приведены размеры в мкм)

мых размеров и сформировать субпиксели. Для предотвращения междупиксельной засветки по контурам матриц можно сформировать отдельной операцией прозрачные подпорки из оксида кремния. Изготовить матрицы изолированных микрокатодов можно на КНИ-пластине *n*-типа проводимости, используя следующую последовательность базовых операций (рис. 7).

1. Осаждение слоя SiO₂ на кремниевую пластину.
2. Фотолитография и формирование маскирующих изображений (рис. 7, а).
3. Газохимическое изотропное травление поверхности кремниевой пластины для получения профиля острий (рис. 7, б).
4. Травление маскирующей пленки SiO₂.
5. Заострение микрокатодов термическим окислением в среде O₂, H₂O (рис. 7, в).
6. Осаждение на поверхность острий защитной пленки Мо.
7. Конформное осаждение на поверхность острий слоя SiO₂ (рис. 7, г).
8. Планаризация поверхности слоя SiO₂ (рис. 7, д).
9. Осаждение слоя поликремния (рис. 7, е).
10. Вторая фотолитография и формирование масок под отверстия экстракционных электродов (рис. 7, ж).

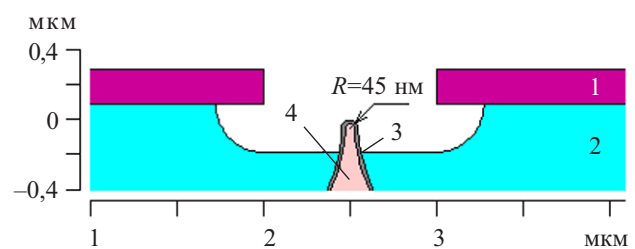


Рис. 8. Сечение острия микрокатада: 1 — поликремниевый электрод; 2 — слой SiO₂; 3 — защитная пленка Мо; 4 — кремниевый микрокатод

11. Газохимическое изотропное травление слоя SiO₂ над остриями микрокатодов (рис. 7, з).

Сечение острия сформированного микрокатада показано на рис. 8. Высота острия кремниевый микрокатада над слоем SiO₂ составляет 200 нм, а радиус его закругления — 45 нм. При напряжении 100 В на электроде и заземленном микрокатоде рассчитанная напряженность поля на острие микрокатада составляет $2,8 \cdot 10^7$ В/см, а эмиссионный ток — $23 \cdot 10^{-9}$ А. На субпикселе размерами 100×100 мкм разместится 1296 микрокатодов (36 рядов и 36 столбцов), усредненный автоэмиссионный ток которых будет равен $27,6 \cdot 10^{-6}$ А. Дополнительно автоэмиссионный ток

матрицы микрокатодов можно стабилизировать, если коммутировать ее последовательно с КНИ МОП-транзистором [29].

Заключение

Обзор существующих типов плоских дисплеев показал, что в условиях, где нужны безынерционность, вибростойкость, высокий уровень контраста, расширенный температурный диапазон функционирования, малая потребляемая мощность, незаменимыми могут стать АЭ-дисплеи. Для увеличения времени жизни АЭ-дисплеев предложено в качестве эмиссионных элементов использовать матрицы микрокатодов, сформированные на КНИ-пластине с помощью базовых операций КМОП-технологии. Замена одного микрокатада матрицей микрокатодов (размером 36×36), покрытых защитной пленкой Мо, существенно снижает разрушающее воздействие ионного тока. Выбор высоковольтного КНИ МОП-транзистора для стабилизации и коммутирования автоэмиссионного тока позволяет монолитно интегрировать матрицы микрокатодов и их схемы управления на одной кремниевой пластине.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Castellano J. A. Handbook of display technology.— London: Academic Press, 1992.
- Shinar J. Organic light-emitting devices.— New York: Springer Verlag, 2004.
- Грознов С., Лейченко А., Шешин Е., Шука А. Плоские дисплейные экраны на основе автоэмиссионных катодов // Chip News.— 2008.— № 7.— С. 21—25.
- Engelsen D. D. The templetion of field emitter displays // Physics procedia.— 2008.— N 1.— P. 355—365.
- Oguchi T., Yamaguchi E., Sasaki K. et al. A 36-inch surface-conduction electron-emitter display (SED) // SID Symposium Digest of Technical Papers.— 2005.— N 36.— P. 1929.
- Dean K. A., Li H., Coll B. F. et al. High brightness, high voltage color field emission display technology // SID Symposium Digest of Technical Papers.— 2006.— N 37.— P. 1845.
- Bechtel H., Czarnojan W., Haase M. et al. Phosphor screens for flat cathode ray tubes // Philips Journal of Research.— 1996.— Vol. 50 (3-4).— P. 433—62.
- Shionoya S., Yen W. M. Phosphor handbook.— Boca Raton: CRC Press, 1999.
- Park S., Kim M. Fabrication method of spacers with high aspect ratio – used in a field emission display (FED) // Microsystem technologies.— 2001.— N 7 (1).— P. 32—37.
- Shea L. E. Low-voltage cathodoluminescent phosphor // Electrochemical society interface.— 1998.— Vol. 7 (2).— P. 24—27.
- Chen S. H., Greeff A. P., Swart H. C. A comparative study between the stimulated and measured cathodoluminescence generated in ZnS:Cu, Al, Au phosphor powder // Journal of Luminescence.— 2005.— Vol. 113.— P. 191—198.
- Burden A. P. Material for field emission display // International material review.— 2001.— Vol. 46.— P. 213—231.
- Xu N. S., Huq S. E. Novel cold cathode materials and applications // Mat. Sci. Eng.— 2005.— Vol. R48.— P. 46.
- Spindt C. A. A thin film emission cathode // J. Appl. Phys.— 1968.— Vol. 39.— P. 3504—3505.
- Yokoo K., Arai M., Mori M. et al. Active control of emission current of field emission array // J. Vac. Sci. Technol. B.— 1995.— Vol. 13 (2).— P. 491—493.
- Lim S., Jeong H., Park Y. et al. Field-emission properties of vertically aligned carbon-nanotube array dependent on gas exposures and growth conditions // J. Vac. Sci. Technol.— 2001.— Vol. A19 (4).— P. 1786—1789.
- Li Y. B., Bando Y., Golberg D., Kurashima K. Field emission from MoO₃ nanobelts // Applied Physics Letters.— 2002.— Vol. 81 (26).— P. 5048—5050.
- Zhao Q., Xu J., Xu X. Y. et al. Field emission from AlN nanoneedle arrays // Applied Physics Letters.— 2004.— Vol. 85 (22).— P. 5331—5333.
- Zeng B., Xiong G., Chen S. et al. Field emission of silicon nanowires // Applied Physics Letters.— 2006.— Vol. 88.— P. 2131081-3.
- Luo S., Chu P. K., Di Z. et al. Vacuum electron field emission from SnO₂ nanowhiskers annealed in N₂ and O₂ atmosphere // Applied Physics Letters.— 2006.— Vol. 88.— P. 0131091-3.
- Wagner R. S., Ellis W. C. The vapor-liquid-solid mechanism of crystal growth and its application to silicon // Trans. Metall. Soc. AIME.— 1965.— Vol. 233.— P. 1053—1064.
- Givargizov E. I., Cryst J. Fundamental aspects of LS growth // Growth.— 1975.— Vol. 31.— P. 20—30.
- Werner P., Schubert L., Zakharov N. D. Silicon nanowhiskers grown on <111> Si substrates by molecular beam epitaxy // Applied Physics Letters.— 2004.— N 84.— P. 4968-70.
- Johnson S., Markwitz A., Rudolphi M., Baumann H. Nanostructuring of silicon (100) using electron beam rapid thermal annealing // Journal of Applied Physics.— 2004.— Vol. 96.— P. 605.
- Kim K. Growth law of silicon oxides by dry oxidation // Semiconductor Science Technology.— 1996.— Vol. 11.— P. 1059—1064.
- Johnson S., Markwitz A., Rudolphi M. et al. Field emission properties of self-assembled silicon nanostructures on *n*- and *p*-type silicon // Applied Physics Letters.— 2004.— N 85.— P. 3277.
- Батурин А. С., Лешуков М. Ю., Труфанов А. И. Эмиссионные характеристики источников света с автокатодом на основе пучка углеродных волокон // Микросистемная техника.— 2004.— № 3.— С. 32—35.
- Leshukov M. Yu., Sheshin E. P. New design of electron gun for field emission light sources with carbon fibers cathode // «Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials». NATO Security through Science. Spec. Issue, Springer Science.— 2007.— P. 245—248.
- Дружинин А. А., Голота В. И., Когут И. Т., Ховерко Ю. М. Приборно-технологическое моделирование автоэмиссионных кремниевых микрокатодов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 5.— С. 43—49.