

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

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

Дата поступления в редакцию
15.05 2009 г.

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

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ УПРАВЛЯЕМЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ МИКРОКАТОДОВ

Разработаны приборные элементы на локальных трехмерных КНИ-структурах. Сравниваются расчетные и экспериментальные характеристики КНИ МОП-транзисторов. Спроектирована топология микрокатаода, интегрированного со схемой управления.

Автоэмиссионные кремниевые микрокатоды, монолитно интегрированные с элементами управления на одной пластине и мультиплицированные в матрицы больших размеров, могут использоваться как фотошаблоны в разрабатываемых системах цифровой электронной литографии с субмикронной разрешающей способностью. Однако для этого необходимо обеспечить линейное регулирование токов автоэмиссии микрокатодов, работоспособность схемы управления при повышенной температуре, равномерность и непрерывность экспозиции топологических элементов разных размеров. Поэтому актуальными являются исследования по стабилизации и регулированию автоэмиссионного тока, формированию КНИ-структур и элементов на их основе для работы при повышенной температуре, интеграции микрокатодов со схемами управления и объединения их в матрицы для равномерного и непрерывного экспонирования топологических элементов, разработка схем и топологий элементов матрицы управляемых автоэмиссионных кремниевых микрокатодов.

Технология формирования локальных трехмерных КНИ-структур

Современные процессы производства КНИ-пластин (SIMOX, BESOI, ELTran, SmartCut/Unibond) являются дорогостоящими и, в той или иной мере, вносят дефекты в кристаллическую решетку поверхностного монокремниевое слоя [1]. В [2] предложено формировать локальные трехмерные КНИ-структуры непосредственно в кремниевой пластине современными методами КМОП-технологий, такими как фотолитография, локальное термическое окисление с использованием нитридных маскирующих пленок, изотропное и анизотропное плазменное травление, формирование в пластине микрополостей. На рис. 1 показана локальная трехмерная КНИ-структура на завершающем этапе технологии ее формирования.

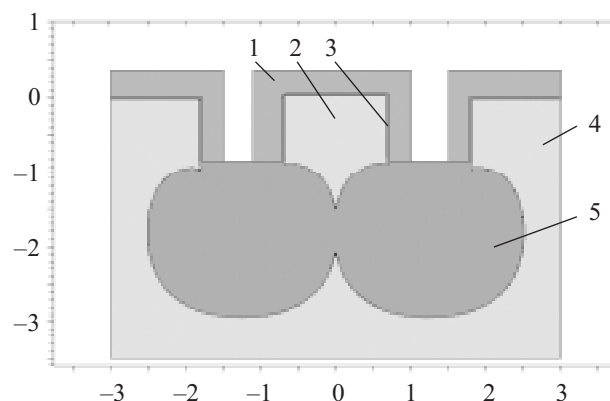


Рис. 1. Локальная трехмерная КНИ МОП-структура:
1 — поликремниевый затвор; 2 — локальная 3D КНИ-структура;
3 — подзатворный изолятор; 4 — подложка Si (100); 5 — область термически окисленного Si

Приборные элементы на локальной 3D КНИ-структуре

Для предложенной локальной трехмерной КНИ-структуры были рассчитаны электрические характеристики и смоделированы следующие оригинальные приборные элементы для микросистемных приложений: стандартный и матричный КНИ КМОП-транзистор с 3D-затвором, ключевой элемент на диодах Шоттки [3], контактные электроды с 3D-поверхностью [4], автоэмиссионный кремниевый микрокатод со схемой управления [5], элемент высокочувствитель-

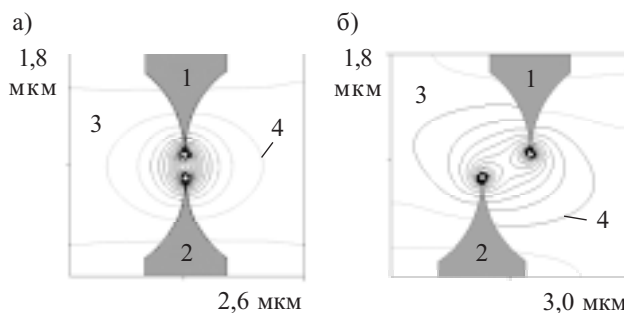


Рис. 2. Высокочувствительный элемент интегрального акселерометра без смещения подвижного элемента (а) и со смещением (б):

1 — подвижный лезвийный микрокатод; 2 — неподвижный микрокатод (подложка); 3 — вакуумная полость; 4 — линии электрического поля

Таблица 1
Ток автоэмиссии при смещении подвижного микро-
катода акселерометра

Смещение, мкм	Напряженность поля, 10^7 В/см	Ток автоэмиссии, 10^{-6} А
0	4,7	1,5
0,2	4,2	0,32
0,4	3,8	0,072

ного акселерометра с регистрацией изменений автоэмиссионного тока. Проведено также компьютерное моделирование последовательности базовых технологических операций формирования микрополостей и микроканалов под поверхностью КНИ-подложки.

На рис. 2 показан высокочувствительный элемент интегрального акселерометра.

При смещении подвижного микрокатода уменьшается напряженность электрического поля в вакуумной полости и, соответственно, ток автоэмиссии, который регистрируется измерительным прибором. Их значения, рассчитанные при разности потенциалов 1000 В между элементами 1 и 2, радиусе кривизны острия лезвийного микрокатода 5 нм и при различных смещениях подвижного катода, приведены в табл. 1.

На рис. 3 показан результат моделирования технологии создания герметизированных микрополостей в кремниевой пластине.

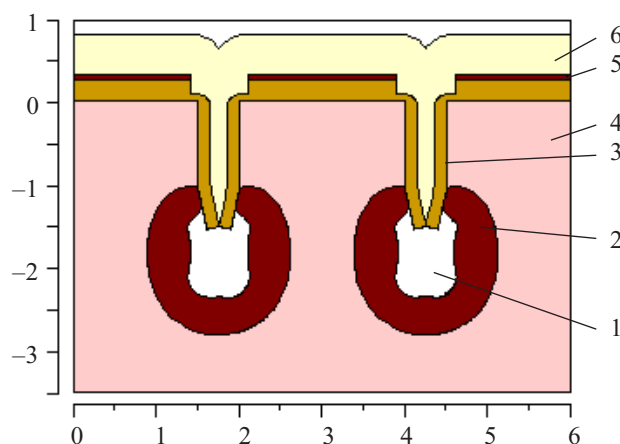


Рис. 3. Поперечное сечение герметизированных микрополостей:

1 — герметизированная полость; 2 — толстый локальный термический оксид; 3 — нитрид кремния; 4 — кремниевая подложка (100); 5 — тонкий термический оксид; 6 — поликремний

Выбор транзисторной модели

Разработанные КНИ МОП-транзисторы могут использоваться в схеме управления микрокатодом, т. к. в отличие от МОП-транзисторов, они являются радиационно-стойкими, занимают меньшую площадь на кристалле, имеют повышенное быстродействие и пониженное энергопотребление, могут работать при повышенных температуре и напряжении. Физические модели для расчета КНИ МОП-транзисторов находятся на стадии разработок и поэтому отсутствуют в доступных программах микроэлектронного моделирова-

ния. В связи с этим были выбраны существующие модели компактных МОП-транзисторов, проведен анализ и выяснена возможность их применения для расчета КНИ МОП-транзисторов. Так, BSIM3/BSIM4-модели достаточно сложны, имеют более сотни параметров со значительной взаимной корреляцией. На сайте разработчика приводится описание модели и ее реализация на языке программирования C, однако исходные коды в ней — неполные, что усложняет их использование для моделирования.

Модель SP основывается на уравнениях поверхностных потенциалов и имеет до 60 параметров [6], однако ее реализация на языках программирования является достаточно сложной задачей.

Модель EKV — наиболее простая, имеет до 20 физических параметров [7], а в литературных источниках приведены исходные коды на языках программирования Verilog-A, Matlab. В EKV-модели при расчетах стокового тока в области сильной и слабой инверсии используется интерполяционная функция $F(v)$, которая инвертируется с использованием итерационной схемы Ньютона–Рафсона, что значительно усложняет ее реализацию. В [8] предложена модифицированная EKV-модель с одним аналитическим уравнением стокового тока для областей сильной и слабой инверсии. В [9] показано, что EKV-модель МОП-транзистора может быть применена для моделирования КНИ МОП-транзистора с незаземленным контактом к подканальной области при ограничении потенциала контакта в уравнении порогового напряжения значением $2\Phi_F$, где Φ_F — потенциал Ферми. Однако лучшим решением при больших потенциалах контакта для предотвращения эффекта «зашелки» является подсоединение подканальной области частично обедненного n -КНИ МОП-транзистора к истоку, как показано на рис. 4.

Для расчета геометрических параметров и статических характеристик КНИ МОП-транзисторов в схеме управления микрокатодом была разработана MatLab-программа модифицированной EKV-модели. Проведены экспериментальные измерения разработанных МОП- и КНИ МОП-транзисторов, изготовленных промышленным способом по технологии с разрешающей способностью 2 мкм. Сравнение расчетных и экспериментальных статических характери-

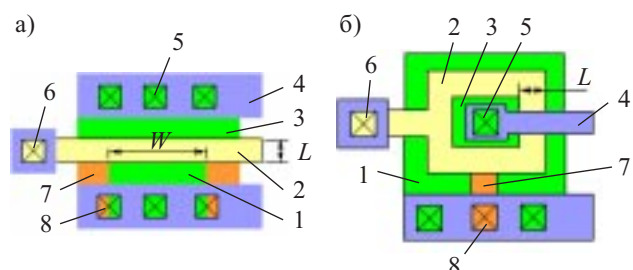


Рис. 4. Топология КНИ МОП-транзистора с затвором прямоугольной (а) и кольцевой (б) формы с подканальной областью, подсоединенной к истоку:

1 — n^+ -исток; 2 — поликремниевый затвор; 3 — n^+ -сток; 4 — металл; 5 — контакт к области n^+ -диффузии; 6 — контакт к поликремнию; 7 — p^+ -контакт к подканальной области; 8 — контакт к области p^+ -диффузии; L — длина канала; W — ширина канала

стик (см. **рис. 5**) показывает, что с помощью компактной EKV-модели МОП-транзистора можно моделировать КНИ МОП-транзисторы с заземленным истоком и контактом к подканальной области при напряжениях стока V_c до 5 В и напряжениях затвора V_3 до 2 В с погрешностью 1—5%.

Схема управления кремниевым автоэмиссионным микрокатодом

Схема управления микрокатодом (**рис. 6**) содержит высоковольтный КНИ МОП-транзистор, импульсно-амплитудный модулятор, коммутационные транзисторы, управляемые тактовыми однополярными им-

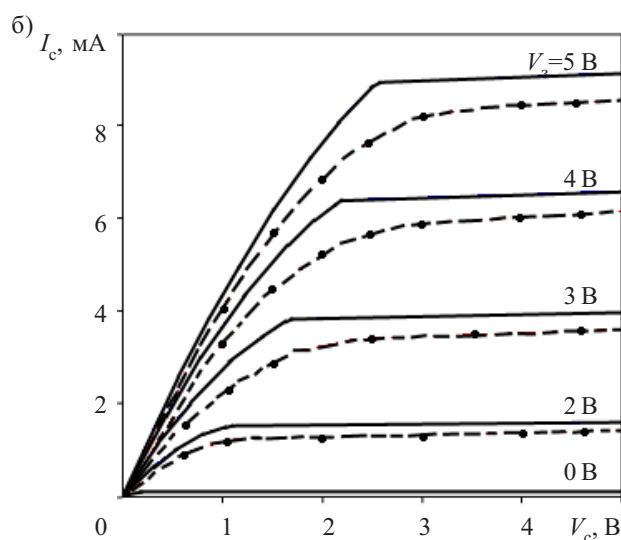
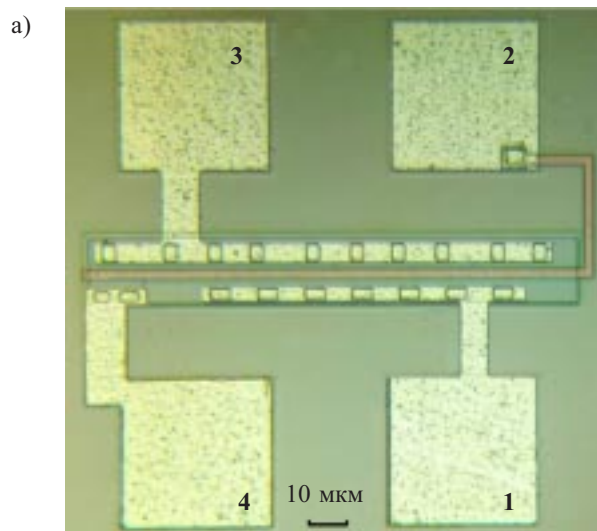


Рис. 5. а) Тестовая структура КНИ МОП-транзистора:

1 — контактная площадка к истоку; 2 — к затвору; 3 — к стоку; 4 — к подканальной области;

б) Статические выходные характеристики тестовой структуры при различных значениях V_3 :

сплошные линии — расчет, пунктир — эксперимент

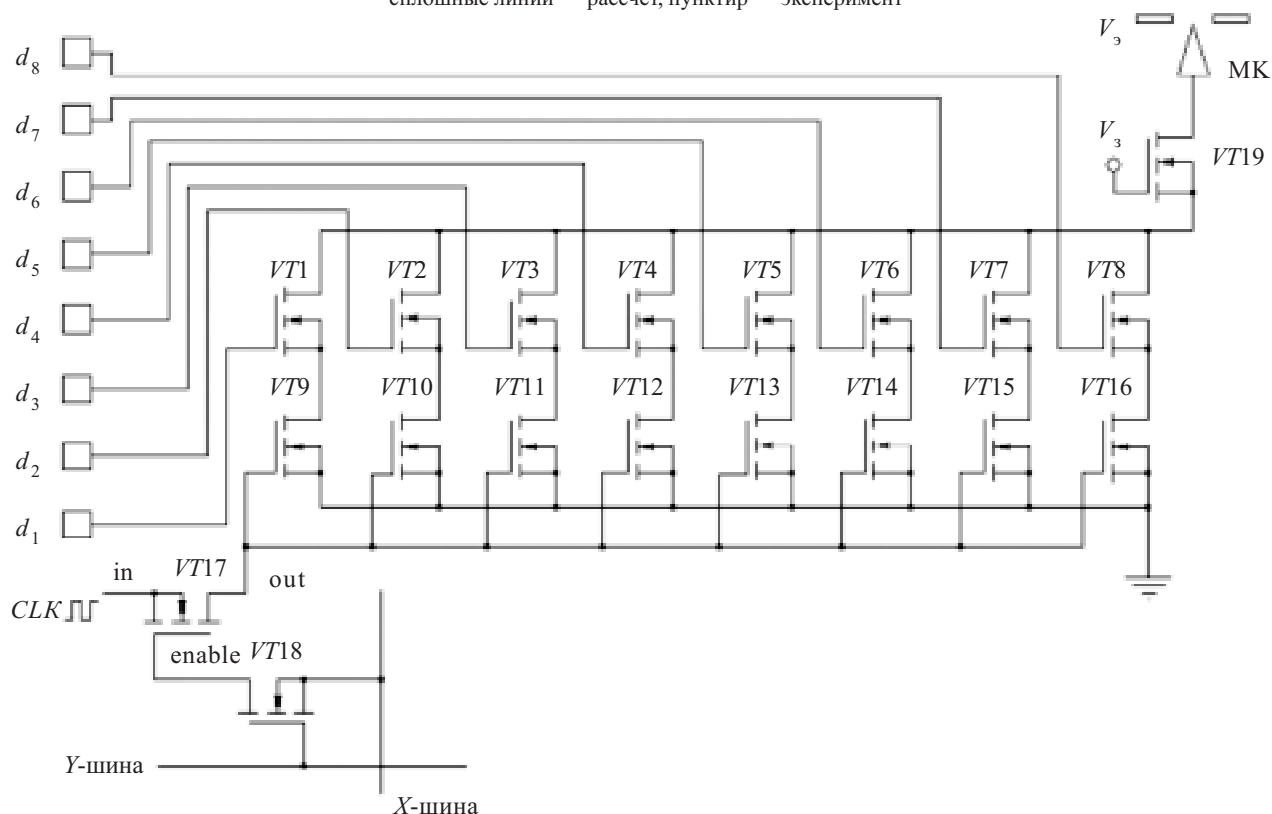


Рис. 6. Схема управления автоэмиссионным микрокатодом:

$d_1, \dots, d_8$ — ячейки памяти; $VT1, \dots, VT8$ — транзисторы импульсно-амплитудного модулятора с $W/L, 2W/L, \dots, 128W/L$, соответственно; $VT9, \dots, VT16$ — коммутационные транзисторы; $VT17$ — транзистор разрешения передачи тактовых импульсов; $VT18$ — транзистор коммутации адресных шин; $VT19$ — высоковольтный КНИ МОП-транзистор; CLK — тактовые импульсы; V_3 — потенциал затвора; V_3 — потенциал экстракционного электрода; МК — микрокатод

пульсами, ячейки памяти статического типа. Высоковольтный КНИ МОП-транзистор защищает низковольтные схемы от высокого напряжения на электродах, стабилизирует и ограничивает максимальный ток автоэмиссии, регулирует процессы адсорбции/десорбции на острие микроэлектрода изменением полярности потенциалов системы «микрокатод—электрод». Импульсно-амплитудный модулятор преобразует бинарный код, который хранится в восьми ячейках памяти статического типа, в 256 фиксированных значений автоэмиссионного тока, которые линейно распределены в интервале от 3 нА до 3 мкА. Ячейки памяти программируются в режиме реального времени технологического процесса литографии и управляют включением/выключением микроэлектрода и дозой экспозиции.

Ширина каналов и значения выходного тока транзисторов импульсно-амплитудного модулятора $VT1—VT8$ последовательно увеличиваются в два раза. При разных комбинациях включения параллельных транзисторов можно получить 256 фиксированных значений суммарного выходного тока на входе высоковольтного транзистора $VT19$. Разные комбинации включения транзистора задаются содержимым программируемых ячеек памяти $d_1—d_8$. Разработанная схема чтения/записи содержимого ячеек памяти с использованием буферов на три состояния показана на рис. 7.

При значении сигнала $CS=0$ буферы B_1, B_2, B_3 находятся в высокоимпедансном состоянии и отключаются от парафазной шины (Data, $\sim$ Data) ячейки памяти, а при $CS=1$ — подключаются к шине. Парафазная шина коммутируется на буферы ввода (B_1, B_3, B_4)

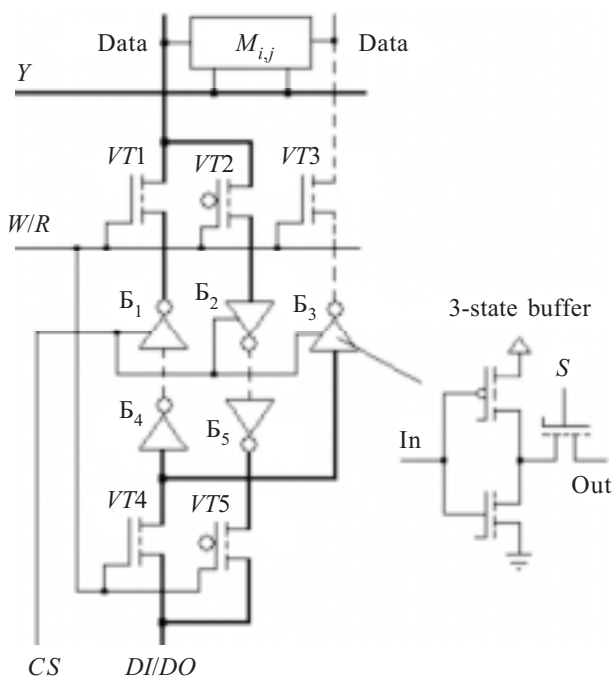


Рис. 7. Схема чтения/записи содержимого ячеек памяти: Y — шина слов; DI/DO — шина данных; сигнал $W/R=0/1$ — запись/чтение данных; сигнал $CS=0/1$ — отключение/подключение DI/DO -шины от/к ячейке памяти; B_1, B_3, B_4 — входные буферы; B_2, B_5 — выходные буферы; $VT1, \dots, VT5$ — ключевые транзисторы

или вывода (B_2, B_5) ключевыми транзисторами ($VT1—VT5$) по сигналу W/R . При значении сигнала $W/R=0$ информация с ячейки памяти M_{ij} преобразуется к однофазному виду, усиливается буферами ввода и подается на шину DO . При значении сигнала $W/R=1$ информация считывается с шины DI , преобразуется к парафазному виду, усиливается буферами ввода B_1, B_3 и записывается в ячейку памяти. Информация хранится в стандартной ячейке памяти статического типа на шести транзисторах с напряжением питания 5 В. Схема и топология ячеек памяти приведены в [10].

Топологии тестовых структур и схемы управления

Экспериментальные измерения проводились на тестовых структурах транзисторов, промышленно изготовленных по технологии с разрешающей способностью 2 мкм. При моделировании КНИ МОП-транзисторов импульсно-амплитудного модулятора были получены следующие значения параметров.

Как видно из табл. 2, импульсно-амплитудный модулятор обеспечивает линейное регулирование автоэмиссионного тока микроэлектрода в интервале 3 нА — 3 мкА при изготовлении транзисторов по технологии с разрешающей способностью 0,6 мкм. Такой интервал тока определен для значений напряженности поля, учитывающих плотность поверхностных состояний и скорость насыщения электронов в кремнии. Топология тестовых структур транзисторов импульсно-амплитудного модулятора $VT1—VT8$ без контактных площадок для технологии с разрешающей способностью 0,6 мкм показана на рис. 8.

Таблица 2

Параметры транзисторов $VT1—VT8$

Транзистор	W/L , мкм	I_c , мкА	V_{th}/V_c , В
$VT1$	0,6/0,6	0,012	1,5/5
$VT2$	1,2/0,6	0,023	1,5/5
$VT3$	2,4/0,6	0,047	1,5/5
$VT4$	4,8/0,6	0,094	1,5/5
$VT5$	0,6/4,8	0,189	2,0/5
$VT6$	0,6/2,4	0,376	2,0/5
$VT7$	0,6/1,2	0,742	2,0/5
$VT8$	0,6/0,6	1,503	2,0/5

Примечание. Область канала транзисторов легирована бором с концентрацией $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

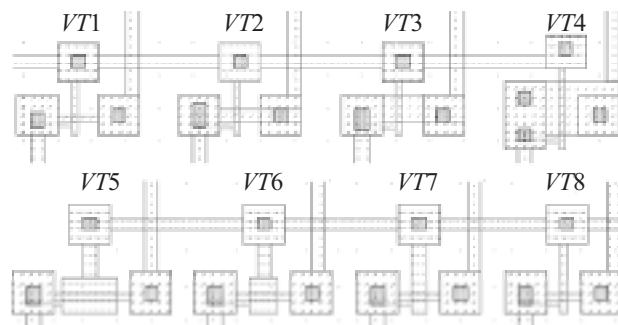


Рис. 8. Топология тестовых структур транзисторов импульсно-амплитудного модулятора

Для согласования напряжения выходных сигналов ячеек памяти и управляющего напряжения на затворах транзисторов импульсно-амплитудного модулятора исследовались делители напряжения на областях поликремния и диффузии n^+ -, p^+ -типов. Топология делителей напряжения показана на **рис. 9**, а тестовая структура областей диффузии — на **рис. 10**.

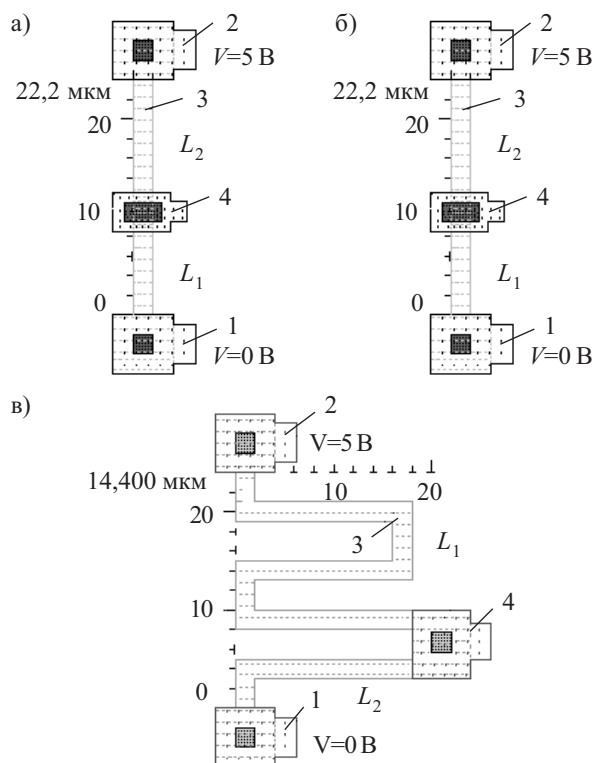


Рис. 9. Топология делителей напряжения на областях:
а — n^+ -диффузии ($R=93,7 \text{ Ом/к}$); б — p^+ -диффузии ($R=78,1 \text{ Ом/к}$);
в — поликремния ($R=35 \text{ Ом/к}$)
1 — земля; 2 — питание; 3 — резистор; 4 — выход делителя

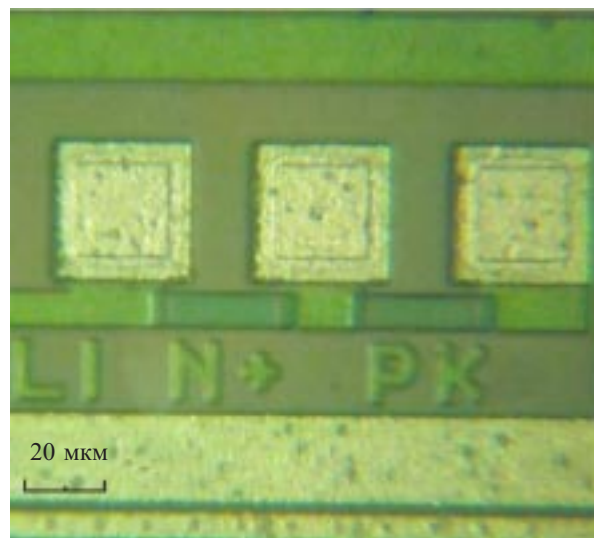


Рис. 10. Тестовая структура:
 N^+ — область n^+ -диффузии; PK — область рекристаллизованного кремния

Для делителей напряжения были выбраны области диффузии n^+ -типа, т. к. они имели наибольшее удельное сопротивление.

С использованием топологии тестовых структур была разработана топология микроатода, интегрированного с высоковольтным КНИ МОП-транзистором, импульсно-амплитудным модулятором, ячейками памяти и буферами ввода/вывода (**рис. 11**).

Топология микроатода, интегрированного со схемой управления, может мультиплицироваться как по оси OX , так и по оси OY для получения матриц большого размера на одной кремниевой пластине. Такая неподвижная пластина, установленная с небольшим углом поворота относительно перемещения экспонируемой пластины с резистом, выполняет функцию

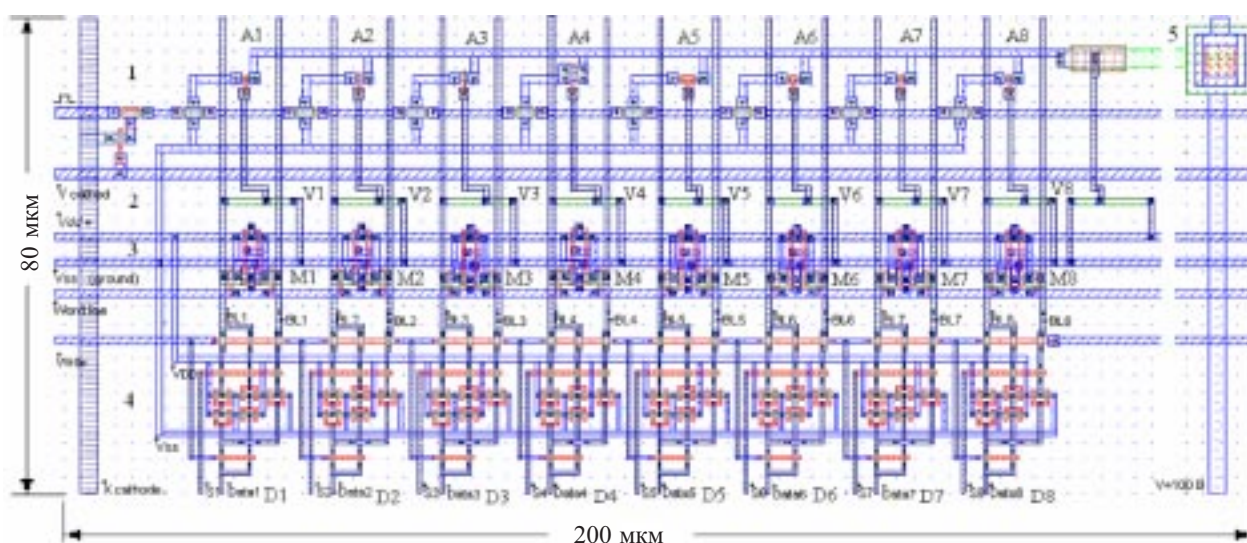


Рис. 11. Топология микроатода, интегрированного со схемой управления:
1 — 8-разрядный импульсно-амплитудный модулятор; 2 — делители напряжения; 3 — ячейки памяти; 4 — буферы ввода/вывода ячеек памяти; 5 — микроатод

программируемого фотошаблона в цифровой электронной литографии.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить область применения компактной EKV-модели МОП-транзистора для расчета характеристик КНИ МОП-транзисторов. Расчетные характеристики сравнивались с экспериментальными выходными характеристиками КНИ МОП-транзистора, в котором подканальная область соединена с истоком. Разработанная схема управления кремниевым микрокатодом обеспечивает линейное регулирование автоэмиссионных токов в интервале 3 нА—3 мкА при напряжении на электродах 100 В. Спроектирована топология микроатода, интегрированного со схемой управления, которую можно мультиплицировать в матрицы больших размеров. Полученные результаты показывают, что матрицы управляемых автоэмиссионных кремниевых микрокатодов могут использоваться в качестве программируемых фотошаблонов в цифровой электронной литографии с субмикронным разрешением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Colinge J. P. Silicon-on-insulator technology: Materials to VLSI.— Norwell (Ma, USA): Kluwer Academic Publishers, 1997.

2. Пат. 36463 України. Спосіб виготовлення локальних тривимірних структур «кремній-на-ізоляторі» / І. Т. Когут, В. І. Голота, А. О. Дружинін, С. В. Сапон.— 27.10.08.

3. Пат. 29698 України. Ключовий елемент на діодах Шоттки з структурами «кремній-на-ізоляторі» / І. Т. Когут, В. І. Голота, А. О. Дружинін.— 25.01.08.

4. Пат. 29701 України. Контакт в інтегральних пристроях зі структурою «кремній-на-ізоляторі» / І. Т. Когут, А. О. Дружинін, В. І. Голота.— 25.01.08.

5. Druzhynin A., Holota V., Kohut I. et al. The device-technological simulation of the field-emission micro-cathodes based on three-dimensional SOI-structures // Electrochemical Society Trans.— 2008.— Vol. 14, N 1.— P. 569.

6. Gildenblat G., Zhu Z., McAndrew C. C. Surface potential equation for bulk MOSFET / Solid-State Electronics.— 2009.— Vol. 53, N 1.— P. 11—13.

7. Bucher M., Lallement C., Enz C. et al. The EPFL-EKV MOSFET model equations for simulation.— EPFL, Lausanne, Switzerland: Technical Report. Model Version 2.6.— 1997.— P. 18.

8. Angelov G. V., Asparuhova K. K. Optimization and simulation of the EKV model using MatLab // Conf. “Electronics 2007”. Book 1.— Sozopol (Bulgaria).— 2007.— P. 19—21.

9. Collinge J. P., Park J. T. Application of the EKV model to the DT MOS SOI transistor // J. of semiconductor and science.— 2003.— Vol. 3, N 4.— P. 223—226.

10. Дружинин А. А., Голота В. И., Когут И. Т. и др. Приборно-технологическое моделирование автоэмиссионных кремниевых микрокатодов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 5.— С. 43—49.

К. ф.-м. н. Н. Б. ГОРЕВ, к. ф.-м. н. И. Ф. КОДЖЕСПИРОВА,
к. ф.-м. н. Е. Н. ПРИВАЛОВ

Украина, г. Днепрпетровск, Институт технической механики
E-mail: gorev57@mail.ru

Дата поступления в редакцию
18.09 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ GaAs

Предложен метод измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур с участками крутого падения с использованием измерительного переменного напряжения умеренно малых амплитуд.

Вольт-фарадные методы определения параметров полупроводниковых структур просты и удобны. Однако в таком практически важном случае как тонкопленочные эпитаксиальные структуры GaAs, которые широко используются в современной микроэлектронике, их применение сопряжено с трудностями. Это связано с тем, что в этих структурах на границе «пленка—подложка» имеется область встроенного объемного заряда, образование которой обусловлено резким градиентом концентрации легирующей примеси в сочетании с наличием незаполненных глубоких центров захвата в полуизолирующей компенсированной подложке [1]. Смыкание этой области с областью объемного заряда барьера Шоттки приводит к невозможности переноса на тонкопленочные эпитаксиаль-

ные структуры вольт-фарадных методов, разработанных для объемных полупроводников [2, 3]. Кроме того, сложной задачей может быть и само проведение вольт-фарадных измерений, поскольку это же смыкание приводит к резкому падению барьерной емкости с ростом напряжения на барьере Шоттки [1]. Поэтому для того, чтобы измеренная барьерная емкость совпадала с фактической, амплитуда переменного напряжения, прикладываемого к барьеру Шоттки для измерения емкости, должна быть весьма малой. Измерения же на таких малых амплитудах могут быть затруднены, в частности, вследствие шума.

В данной работе предлагается метод, позволяющий измерять вольт-фарадные характеристики с участками крутого падения при помощи переменного напряжения умеренно малых амплитуд (порядка 100 мВ), на которых работают стандартные измерители емкости.

Общепринятая процедура измерения зависимости барьерной емкости C от величины постоянного напряжения V_{DC} на барьере Шоттки заключается в следующем: к барьеру прикладывается малое перемен-