

УДК 621.397.46

## ПАССИВНО-МАТРИЧНЫЕ МИКРОДИСПЛЕИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ТИПА

А.С. МОХАММЕД, Е.В. МУХА, А.А. СТЕПАНОВ, А.Г. СМИРНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 1 апреля 2014*

Описаны конструкция, технология и основные параметры пассивно-матричного микродисплея светоизлучающего типа на основе Шоттки-структуры нанопористый кремний/алюминий для персональных видеопроекционных систем с улучшенными потребительскими свойствами. Контроль их функционирования осуществлялся визуально с помощью специально разработанных методики и программно-аппаратного комплекса, включающего генератор испытательных сигналов в виде набора тестовых полей и программного обеспечения, установленного на персональном компьютере с операционной системой Windows XP.

*Ключевые слова:* видеопроекционное устройство, микродисплей, контроль функционирования.

### Введение

В настоящее время наблюдается новый виток интереса к микродисплейной технике в связи с тем, что начиная с 2013 г. крупнейшие корпорации мира Google, Microsoft, Samsung и др., закончили разработки и начали промышленное производство различных вариантов «умных очков» и мобильных устройств телекоммуникации на их основе, главным техническим компонентом которых являются микродисплеи (см. рис. 1). Из-за того, что дистанция наблюдения составляет всего несколько сантиметров, изображение воспринимается глазом человека как «виртуальное», соответствующее полноэкранному изображению 40-дюймового экрана телевизора с расстояния нескольких метров (см. рис. 2). Как видно из рисунка, выигрыш в эффективности отображения информации достигает 300-500 раз. Несомненно, что функциональность «умных очков» определяется используемым программным обеспечением, однако их потребительские свойства зависят, в первую очередь, от параметров и характеристик применяемых в них микродисплеев.

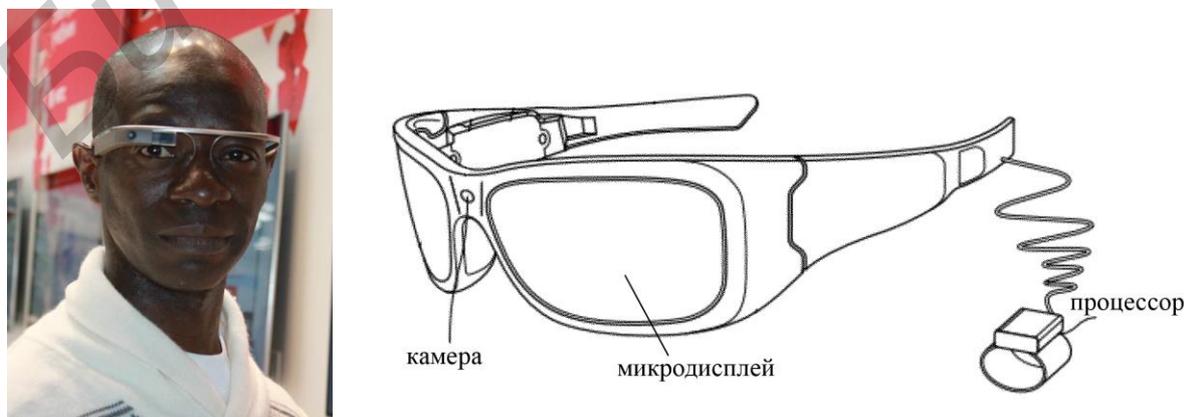


Рис. 1. «Умные» очки Google (слева) и Microsoft (справа)

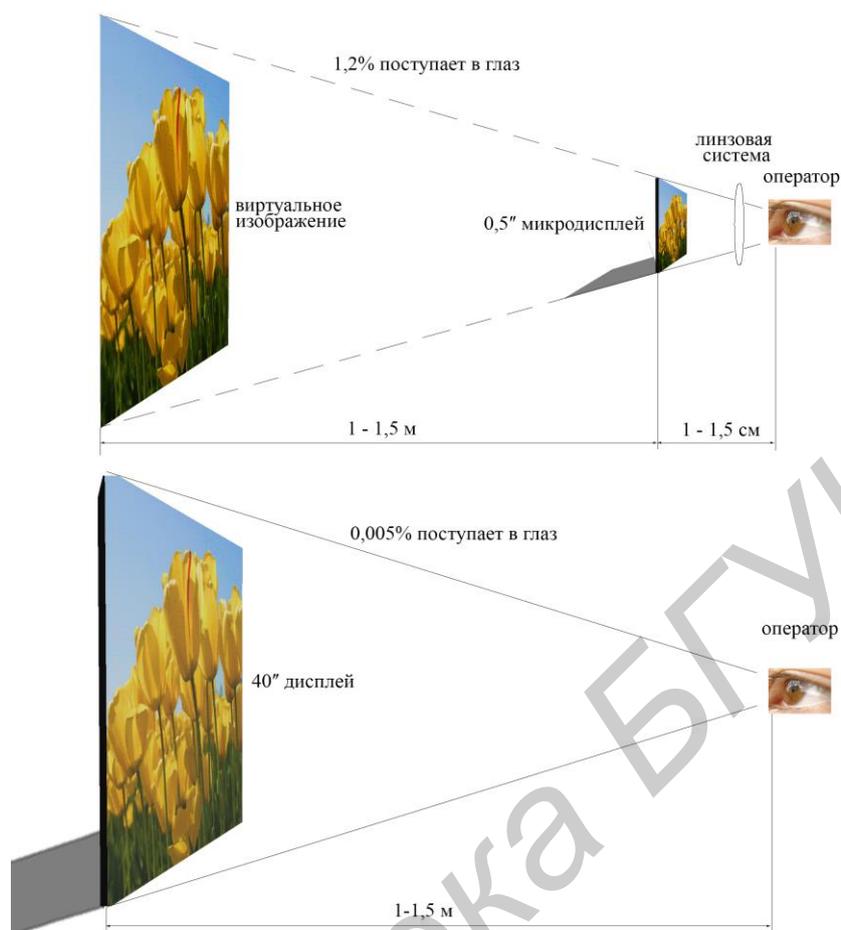


Рис. 2. Повышение эффективности отображения информации с помощью микродисплейных технологий

В данной работе приведены результаты разработки и исследования пассивно-матричных микродисплеев светоизлучающего типа на основе низковольтных электролюминесцентных Шоттки-структур нанопористый кремний/алюминий.

Электролюминесценция в кремнии с квантовой эффективностью  $\sim 10^{-8}$  впервые была получена в 50-х годах прошлого века. В дальнейшем было обнаружено, что создание массива квантовых точек или нитей путем самоформирования кремниевых наноструктур в процессе электрохимической обработки в растворах плавиковой кислоты значительно повышает эффективность электролюминесценции. Обзор достижений в этой области приведен в работе [1].

К настоящему времени у обратно смещенных (лавинных) диодов на наноструктурированном кремнии достигнута внешняя квантовая эффективность 1,4 %, что открывает перспективы создания полностью кремниевых высокоскоростных оптоэлектронных систем передачи данных, высокоинформативных микродисплеев и др. Однако физические процессы, происходящие в подобных структурах, еще недостаточно изучены, оптимизация светодиодов идет путем «проб и ошибок», а полученные результаты далеко не всегда уверенно воспроизводятся.

### Пассивно-матричные микродисплеи с мультиплексным управлением

Нанопористый кремний является перспективным материалом, поскольку на его основе возможно изготовление полностью интегрированных со схемами управления микродисплеев, отличающихся повышенными функциональными возможностями и надежностью, высокими эргономическими параметрами и приемлемой стоимостью [2-4]. Такие микродисплеи представляют собой матрицу Шоттки диодов алюминий/нанопористый кремний (рис. 3), эффективно излучающие в видимой области спектра при подаче обратного напряжения на уровне нескольких вольт. Основное их преимущество – минимальные размеры элементов

отображения (пикселей), высокое разрешение и быстродействие, возможность использования стандартной кремниевой КМОП-технологии при существующих проектных нормах, что обеспечивает их низкую себестоимость при практически нулевых начальных инвестициях в производственную базу.

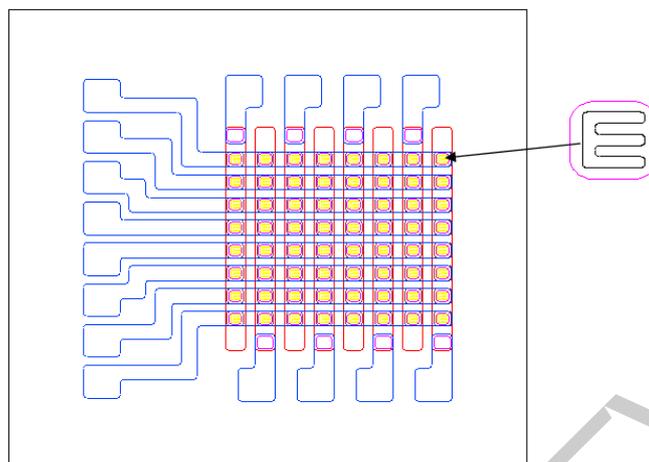


Рис. 3. Топология тестового кристалла микродисплея

Следует отметить, что светоизлучающие микродисплеи (LED, OLED) имеют ряд принципиальных преимуществ перед жидкокристаллическими LCOS микродисплеями, так как обладают существенно более высоким быстродействием по сравнению с ЖК ячейками, что позволяет создавать высокоинформативные пассивно-матричные микродисплеи с высоким качеством изображения.

Малое время отклика и работа на больших плотностях тока позволяют реализовать эффективное мультиплексирование и, в итоге, создать недорогие высокоинформативные пассивно-матричные микродисплеи. Например, при плотности рабочего тока  $J = 7000 \text{ A/cm}^2$ , активной площади излучающей поверхности  $A^2 = 0,6 \times 0,6 \text{ см}$ , напряжении смещения  $V = 8 \text{ В}$ , внешней энергетической эффективности  $\eta = 0,3 \%$  и мощности излучения  $W = 0,2 \text{ мВт}$ , возможно достижение уровня мультиплексирования  $M$ , равного  $M = (J \cdot V \cdot \eta \cdot A^2) / W = 302400$ , что соответствует VGA формату разрешения микродисплея. Для 10 мс цикла его адресации, временной отклик каждого пикселя должен быть  $\sim 30$  наносекунд, что легко достигается в кремниевых светоизлучающих диодах. При таком уровне мультиплексирования возможно прямое отображение видеoinформации (как в электронно-лучевых трубках) без дополнительных микросхем памяти и использования специфических драйверов.

В НИИ 4.7 БГУИР для создания высокостабильных кремниевых лавинных светодиодов традиционно используется электродная система Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> поверх нанопористого кремния. Технологически эта система формируется путем напыления алюминия и последующим анодированием через фоторезистивную маску. Основными преимуществами данной технологии являются:

- использование низкотемпературных процессов;
- вакуумная очистка слоя пористого кремния в процессе подготовки и напыления Al;
- полная изоляция слоя пористого кремния от внешних воздействий пленкой Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В процессе разработки и изготовления тестовых кристаллов пассивно-матричных микродисплеев на основе нанопористого кремния были решены проблемы, связанные как с особенностями светоизлучающих элементов (повышением напряжения пробоя, «мертвым» током на начальном участке ампер-яркостной характеристики, выводом излучения по периметру электрода), так и с особенностями функционирования пассивно-матричного дисплея в целом (проблема токоподвода к отдельным светодиодам по узкой длинной шине, проблемы экранирования излучения и смещения вольт-яркостных характеристик, проблема создания большого количества сильноточных ключей для управления пассивной матрицей и др.). Внешний вид тестового кристалла и активной структуры в поперечном разрезе приведены на рис. 4 и 5.

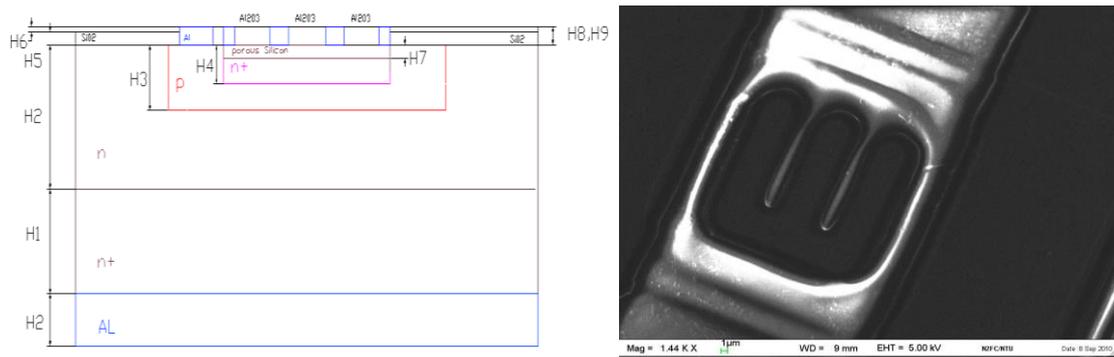


Рис. 4. Активная структура тестового кристалла микродисплея в поперечном разрезе

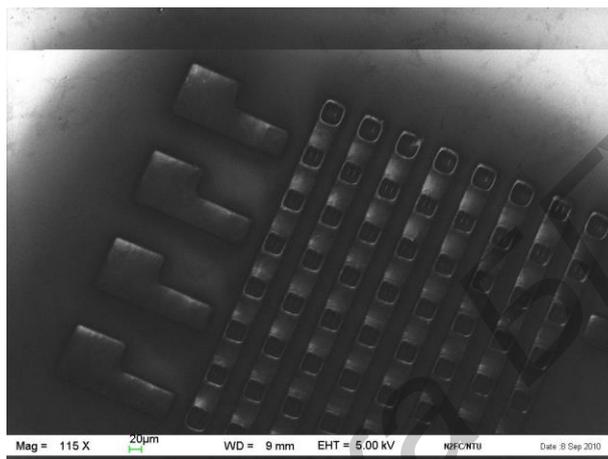


Рис. 5. Внешний вид кристалла микродисплея

Основной особенностью данной структуры является использование в качестве верхнего электрода Шоттки диода специально сформированного наноструктурированного слоя алюминия, обладающего прозрачностью на уровне 65–70 % [5,6] и малым удельным электрическим сопротивлением на уровне 100 Ом/кв., что позволило существенно повысить эффективность работы прибора.

### Технология формирования слоев нанопористого кремния

Стандартным технологическим приемом формирования наноструктурированного пористого кремния как функционального слоя для светоизлучающих приборов оптоэлектроники является электрохимическое травление (анодирование) в концентрированной плавиковой кислоте [5], имеющем такие существенные недостатки, как малое время травления (несколько секунд для получения тонких нанопористых слоев), высокая токсичность для операторов и агрессивное воздействие плавиковой кислоты на металлизацию. В данной работе для формирования стабильных и воспроизводимых слоев нанопористого кремния мы впервые использовали раствор соли плавиковой кислоты состава  $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$  со сверхмалой концентрацией ионов фтора. Добавление этанола ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) в раствор позволяет эффективно смачивать поверхность кремния, в результате чего увеличивается воспроизводимость процесса, а добавление ортофосфорной кислоты ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) позволяет контролировать уровень ионов фтора в растворе и получать равномерные пористые слои по всей поверхности анодирования. Использование фторида аммония ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) снижает уровень токсичности до абсолютно безопасного для операторов предела, а также минимизирует агрессивное воздействие на металлизацию приборов.

Зависимость размера пор в растворе  $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$  от концентрации  $\text{NH}_4\text{F}$  при плотности тока  $J = 0,1 \text{ мА/см}^2$  приведена на рис. 6. Видно, что с увеличением концентрации  $\text{NH}_4\text{F}$  с 5 до 25 масс. % размер пор уменьшается с 20 до 10 нм. При этом пористые слои имеют губчатую структуру и пористость в пределах 70–80 %.

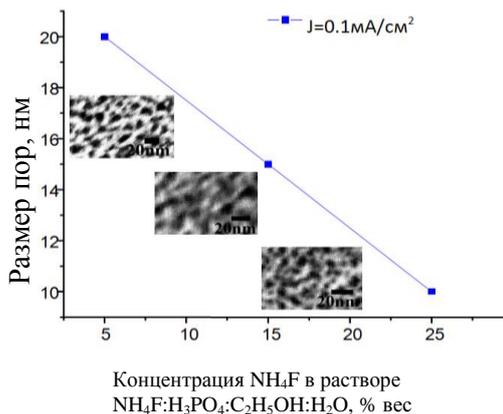


Рис. 6. Зависимость размера пор от концентрации  $\text{NH}_4\text{F}$  в растворе  $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$

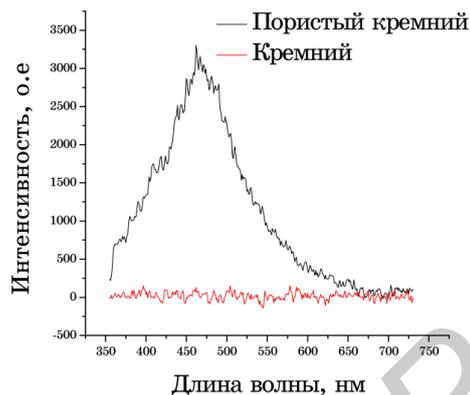


Рис. 7. Спектры фотолуминесценции нанопористого и монокристаллического кремния

Спектры фотолуминесценции нанопористого и монокристаллического кремния показаны на рис. 7. Как видно из рисунка, пик фотолуминесценции для нанопористого кремния лежит в голубой области (460 нм).

### Оптимизация технологического процесса

В табл. 1 приведена последовательность оптимизированных технологических операций изготовления тестового кристалла матричного микродисплея светоизлучающего типа на основе нанопористого кремния, совместимых со стандартной КМОП-технологией.

Технологический маршрут и основные параметры структуры

Элементы структуры		Толщина, мкм	Тип проводимости	Используемый материал		Поверхностное сопротивление	Удельное сопротивление Ом·см
Наименование	Обозн.			Наименование	ГОСТ, ОСТ, ТУ		
Подложка	H1	255 ± 20	<i>n</i>	Легирующая добавка–сурьма	–	–	0,01
Эпитаксиальный слой	H2	13 ± 1,5	<i>n</i>	Легирующая добавка–фосфор	–	–	3,0 ± 0,3
База	H3	3,2 ± 0,5	<i>p</i>	флюобор	ОСТ 6-02-4-83	250 ± 50	–
Эмиттер	H4	2,0 ± 0,8	<i>n</i>	Фосфор треххлористый особой чистоты	ЕТО.035.290 ТУ	3-7	–
Окисел	H5	0,7 ± 0,07	–	Двуокись кремния	–	–	–
Защитный слой (СТФСС)	H6*	0,2 - 0,27	–	Тетраэтоксисилан ОСЧ.14-50П-1 Триметиловый эфир фосфорной кислоты	ТУ6-09-5230-85 ТУ6-09-3473-78	–	–
Анодирование кремния в <i>n</i> -карманах	H7	0,4 – 0,6	<i>n</i>	Раствор $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}$ в различных соотношениях	–	–	–
Металлизация	H8	1,0 – 1,2	–	Слитки алюминиевые цилиндрические А995 250Х400 Н Заготовка АК 1,0 270x120x238 К	ГОСТ 1943 7-81 ЯеО. 021.157ТУ	–	–
Анодирование алюминия	H9	1,0 – 1,2	–	Раствор $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}$ в различных соотношениях	–	–	–

Достигнуты следующие основные параметры излучающих структур:

- минимальное пространственное разрешение 12x12 мкм;
- рабочее напряжение от –5 до –8 В;
- быстродействие от 5 до 30 нс;
- плотность рабочего тока до 7000 А/см<sup>2</sup> в импульсе;

- яркость излучения не менее 20 Кд/м<sup>2</sup>;
- внешняя эффективность не менее 1 %;
- срок службы не менее 7000 час.

Таким образом, светоизлучающие пассивно-матричные микродисплеи на основе кремниевых лавинных светодиодов могут рассматриваться в качестве реальных конкурентов на рынке видеопроекционных устройств отображения информации персонального типа.

### **Заключение**

В данной статье описаны конструкция, технология и основные параметры пассивно-матричных микродисплеев на основе обратно смещенных Шоттки диодов со структурой нанопористый кремний/алюминий. Особое внимание уделено процессу формирования нанопористых слоев кремния требуемой толщины, обладающих высокой пористостью, губчатой структурой с наноразмерными порами, что позволяет эффективно использовать их в светоизлучающих оптоэлектронных приборах различного назначения.

Уникальность параметров кремниевых светоизлучающих диодов позволяет конструировать на их основе недорогие пассивно-матричные высокоинформативные микродисплеи, которые можно использовать в видеопроекционных устройствах персонального типа нового поколения.

## **PASSIVE MATRIX LIGHT EMITTING MICRODISPLAYS**

A.S. MOHAMMED, Y.U. MUKHA, A.A. STSIAPANAU, A.G. SMIRNOV

### **Abstract**

The construction, technology and main features of passive matrix light emitting microdisplays based on reverse biased Schottki diodes with the structure of nanoporous Silicon-Aluminium are described.

### **Список литературы**

1. *Jaguiro P.* // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2009. № 41. P. 927–930.
2. *Hubarevich A., Mukha Y., Smirnov A. et. al.* // Quantum Electronics & Optoelectronics. 2010. Vol. 13, № 3. P. 294–297
3. *Jaguiro P., Stsiapanau A., Hubarevich A. et. al.* // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2010. Vol. 13, № 3. P. 305–308.
4. *Smirnov A., Hubarevich A., Stsiapanau A. et. al.* // Abstracts of 15<sup>th</sup> int. Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting and 18<sup>th</sup> Advanced Display Technologies int. Symposium ADT-2010, Russia, September 2010.
5. *Смирнов А., Губаревич А., Степанов А. и др.* // Тез. докл. 2-ой междунар. научн. конф. «Наноструктурные материалы-2010». Украина, Киев, октябрь 2010 г.