

УДК 535.376

МИКРОДИСПЛЕЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ТИПА НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

П.В. ЖАГИРО, А.В. ВЫСОЦКИЙ, П.С. КАЦУБА, П.Ф. СЕРБУН и А.Г. СМИРНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 25 апреля 2008

Рассмотрены основные проблемы и перспективы создания светоизлучающих пассивно-матричных микродисплеев на основе наноструктурированного кремния. В настоящее время наиболее перспективными представляются лавинные светоизлучающие структуры на основе пористого кремния. Они характеризуются большим сроком службы (>10000 часов), непрерывным спектром, позволяющим выделить цвета RGB, невысоким рабочим напряжением (менее 12 В) с крутой вольт-амперной характеристикой (ВАХ), малым временем отклика (единицы нс), высокой плотностью рабочего тока. В статье рассматриваются базовые принципы, технология и достижения в исследовании и разработке кремниевых светоизлучающих диодов и микродисплеев с матрицей высокого разрешения.

Ключевые слова: электролюминесценция, диод Шоттки, наноструктурированный кремний, микродисплей, пассивная матрица.

Введение

Исследование светового излучения кремниевых структур началось более пяти десятилетий тому назад [1]. С тех пор кремниевая технология шагнула далеко вперед и, соответственно, квантовый выход кремниевых светодиодов был поднят от 10^{-6} до нескольких процентов [2-4]. Важной вехой на этом пути явилось обнаружение электролюминесценции в видимом диапазоне при лавинном пробое диодов Шоттки на пористом кремнии [5]. В настоящее время эти светодиоды характеризуются продолжительным сроком службы, невысоким рабочим напряжением (<12 В), крутой ВАХ, наносекундным временным откликом и высокой рабочей плотностью тока (до 8000 А/см² в импульсном режиме). При особых условиях высокая эффективность электролюминесценции может быть достигнута и на монокристаллическом кремнии [6-7]. Указанные свойства кремниевых светодиодов позволяют проектировать высокоэффективные и недорогие пассивно-матричные микродисплеи.

Электролюминесценция горячих носителей в структурах на квантовых точках

Эффективная электролюминесценция может быть получена не только в инжекционном процессе, но и в результате ударной ионизации [8]. Как правило, механизм ударной ионизации реализуется в обратносмещенных сильно легированных р-п переходах и диодах Шоттки, работающих в режиме лавинного пробоя. Впервые электролюминесценция кремния с квантовой эффективностью $\sim 10^{-8}$ была получена в 50-х годах прошлого века. [9]. В дальнейшем было обнаружено, что создание массива квантовых точек или нитей путем самоформирования кремниевых наноструктур в процессе электрохимической обработки в растворах плавиковой кисло-

ты, значительно повышает эффективность электролюминесценции. Обзор исследований в этой области приведен в [10].

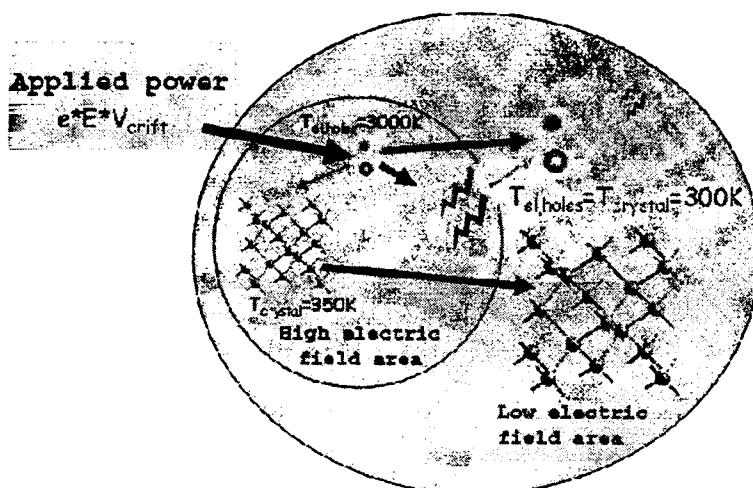


Рис. 1. Процесс преобразования энергии в лавинном светодиоде

Рис. 1 иллюстрирует процесс преобразования энергии в лавинном светодиоде. Высокая температура электронного газа достигается в тонкой области сильного поля (толщиной всего несколько десятков нанометров), при этом атомарная решетка остается практически холодной, из-за огромного различия масс атома кремния и электрона. Детальное моделирование процесса лавинного пробоя и электролюминесценции в слоях пористого кремния в настоящее время затруднено из-за недостаточной изученности его свойств в сильных полях. В качестве первого приближения обычно используют параметры монокристаллического кремния в сильных полях.

Механизм рассеяния энергии горячими носителями отличается от случая слабых полей: определяющим становится рассеяние не на акустических, а на оптических фононах [11]. Длина свободного пробега резко уменьшается от ~ 70 нм в до ~ 6.4 нм, а средние потери энергии на одно соударение составляют 0,053 эВ. Горячие электроны и дырки могут генерировать новые носители путем ударной ионизации. При напряженности поля $\sim 5 \cdot 10^5$ В/см коэффициент ионизации для электронов ~ 30 раз выше чем для дырок, при этом только один акт ударной ионизации приходится приблизительно на 50 обычных столкновений. Расчет температуры электронного газа и соответствующих спектров излучения проведен в [6].

Преимущества использования структур $\text{Al}+(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{-porSi}$ в светоизлучающих дисплеях

Нашей группой для создания светоизлучающих диодов Шоттки традиционно используется электродная система $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$ поверх пористого кремния. Технологически эта система формируется путем напыления алюминия и последующим анодированием через фоторезистивную маску.

Основным 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 сплошной пленкой $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$.

При использовании в качестве электродного материала сплава Al-Si (стандартный процесс в микроэлектронике) подавляется взаимодиффузия алюминий-кремний, что также увеличивает стабильность работы и срок службы светодиода. Алюминий обладает малым удельным сопротивлением и легко разваривается, что позволяет корпусировать опытные образцы для облегчения процесса дальнейших исследований.

Основными преимуществами пористого кремния как электролюминесцирующего материала являются:

- совместимость с CMOS кремниевой технологией [12];
- высокое пространственное разрешение (нами были созданы работоспособные светоизлучающие пиксели размером 12×12 мкм) [12];
- высокое быстродействие (единицы наносекунд) [13];
- высокая стабильность и длительный срок службы [5];
- сплошной, близкий к белому спектр излучения [14];
- низкое рабочее напряжение (менее 12 В) и крутая ВАХ [5].

Основными особенностями светодиодов на пористом кремнии, которые необходимо учитывать при конструировании дисплейных матриц на их основе, являются:

- повышение напряжения пробоя;
- «мертвый» ток на начальном участке ампер-яркостной характеристики;
- вывод излучения по периметру электрода.

В дальнейшем эти особенности будут рассмотрены более подробно.

Повышение напряжения пробоя

Пористый кремний отличается от обычного кремния по своим электрическим свойствам, например, в переходах на пористом кремнии значительно увеличивается напряжение пробоя. Это явление может быть объяснено наличием в кремнии оборванных нитей ("broken filaments") – части пористой структуры, которая не участвует в переносе тока. Но электрофизическое поведение пористого кремния схоже с поведением монокристаллическим кремнием, имеющего другой уровень легирования. Этот "эффективный уровень легирования" может быть рассчитан как:

$$N_{эф} = N \cdot (1 - B) / (1 - \chi + \chi / \epsilon_{Si}),$$

где N – уровень легирования кремниевой подложки; χ – пористость пористого кремния; $\epsilon_{Si} = 11,7$ – диэлектрическая постоянная кремния; B – относительный объем "оборванных нитей".

Отметим, что при проектировании топологии изменение эффективного уровня легирования является серьезной проблемой, так как пробивное напряжение прехода электрод-подложка ниже пробивного напряжения электрод-пористый кремний.

«Мертвый» ток на начальном участке ампер-яркостной характеристики

Улучшить эффективность и снизить рабочее напряжение лавинного светодиода можно при использовании высоколегированного кремния, так в этом случае создаются области с высоким электрическим полем. Эта технология позволяет увеличивать локальную величину электрического поля, но появляется другая проблема - туннельный пробой. Туннельный ток не генерирует горячих носителей, и с точки зрения светового испускания, является паразитным. Наиболее эффективные светодиоды работают в смешанном режиме лавинного/туннельного пробоя. Вольт-амперная характеристика лавинный пробоя более крутая чем туннельного пробоя и, фактически, величина туннельного тока «фиксируется» как только возникает лавинный пробой. Но до возникновения лавинного пробоя появляется "мертвый" туннельный ток, не сопровождающийся световым излучением, как показано на рис. 2. Отметим, что образец, с туннельным током 7 мА, полученный на высоколегированном кремнии, имеет значительно меньшую площадь, работает с более высокими плотностями тока и показывает лучшую эффективность.

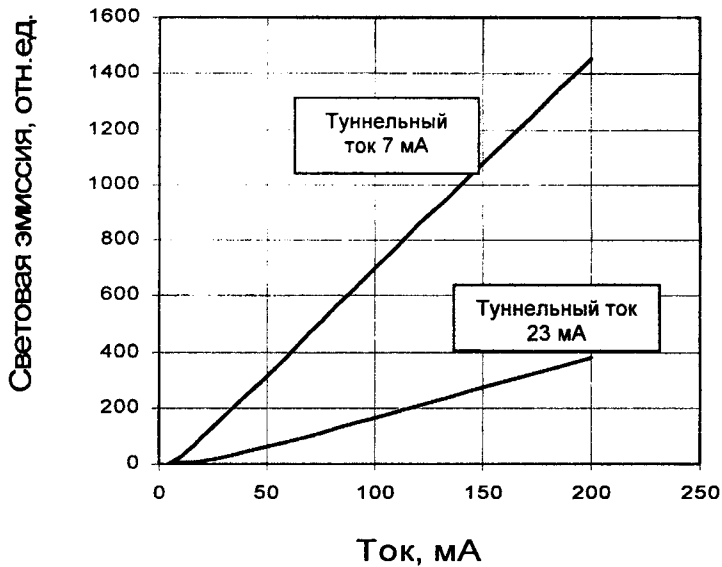


Рис. 2. Ампер-яркостные характеристики кремниевых светодиодов «7 мА» - пористый кремний 1 мкм - сплошной алюминий «23 мА» - пористый кремний 0,5 мкм - сплошной алюминий

Вывод излучения по периметру электрода

Основной недостаток электродной системы $Al - Al_2O_3$ – это проблема вывода излучения. Из-за непрозрачности алюминия свет выходит только по периметру электрода, в то время как проходящий ток пропорционален площади всей электродной площадки [15, 16].

На рисунке 3 а показана базовая топология светодиодов на пористом кремнии, служащая основой для разработки пассивно-адресуемого микродисплея. Это планарная топология имеет существенную проблему - свет экранируется Al электродом. Чтобы улучшить эффективность необходимо увеличить отношение периметра по к поверхности, например, изменяя форму электрода от сплошной площадки до сетчатой микро- и наноструктуры.

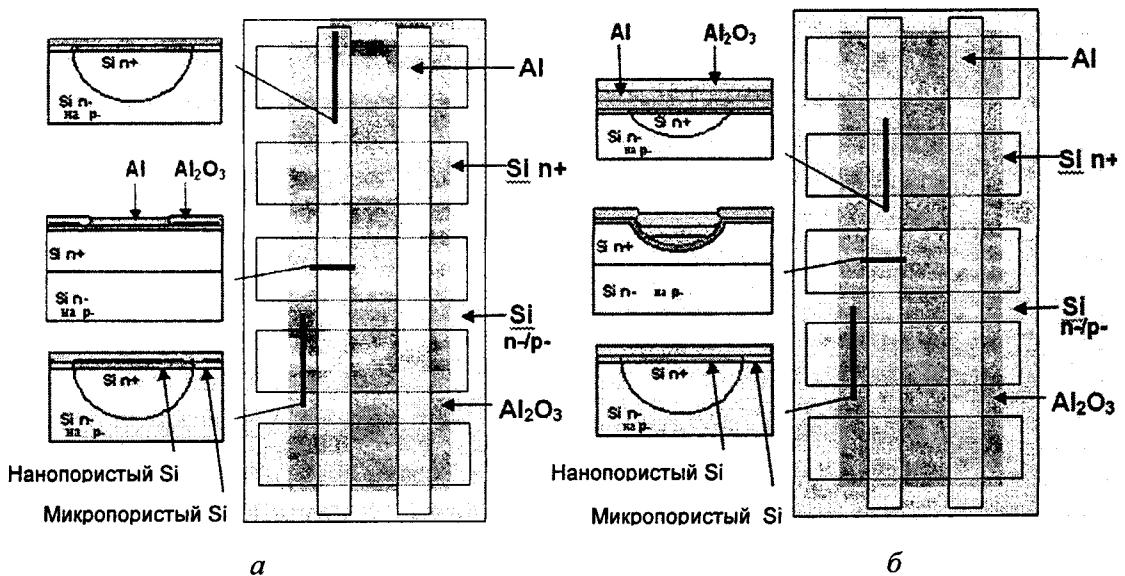


Рис. 3. Планарная (а) и скрытая (б) структура топологии пористого кремния, служащая основой пассивно-адресуемого микродисплея (не в масштабе)

Другой способ увеличить эффективность - это использование скрытой мезаструктуры. Соответствующая топология показана на рисунке 3, б. Скрытый диэлектрический слой предотвращает протекание электрического тока в закрытой, электродом области.

Микродисплеи со светоизлучающими элементами на пористом кремнии

Энергетическая эффективность кремниевых светодиодов ниже, чем у традиционных прямозонных светодиодов, таким образом, они не могут конкурировать на рынке простых дискретных индикаторов. До недавнего времени исследование кремния в качестве базовой основы для матриц микродисплеев было ограничено теоретическими изысканиями, без перехода в практическую плоскость, по причине низкой эффективности и малые размеры дисплеев. Ситуация радикально изменилась с началом формирования рынка микродисплеев. В настоящее время, очевидно, что кремниевые светоизлучающие пассивно-матричные микродисплеи с интегрированными драйверами могут быть вполне конкурентоспособны.

Когда мы сравниваем эффективность обычного настольного монитора и микродисплея, формирующего виртуальное изображение того же размера, то оказывается, что энергетический выигрыш последнего достигает 200-500 раз (см. рис. 4). Если же принять в расчет, что для экранирующей внешнюю засветку микродисплея достаточна яркость в 50 кд/м, то энергетический выигрыш может составить 3000 раз.

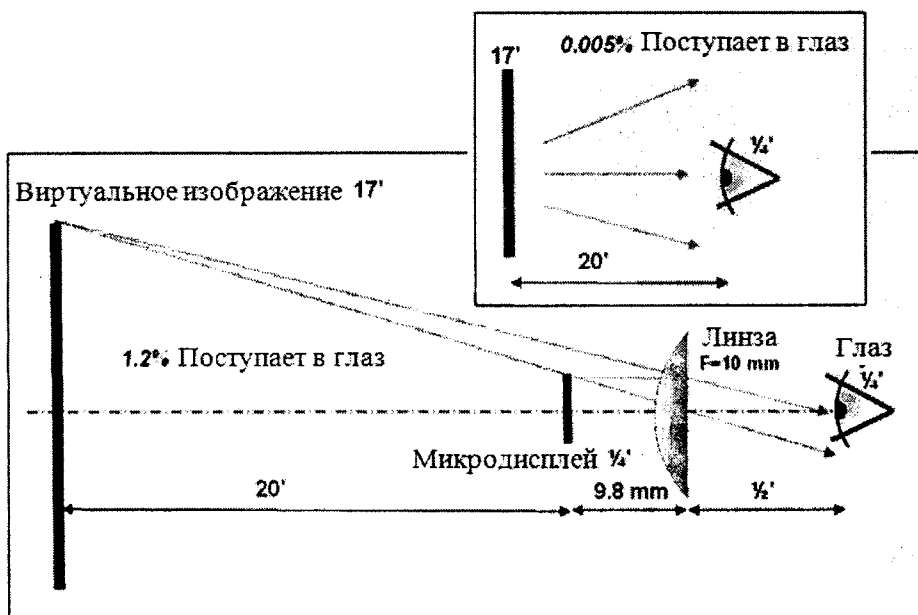


Рис. 4. Сравнение эффективности настольного монитора и микродисплея

Малое время отклика и работа на больших плотностях тока позволяют реализовать эффективное мультиплексирование и, в итоге, создать недорогие высокоинформативные пассивно-матричные микродисплеи. Например, если плотность рабочего тока J достигает 7000 A/cm^2 , активная площадь A составляет $6 \times 6 \text{ мм}$, приложенное напряжение $V_a = 8 \text{ В}$, а внешняя энергетическая эффективность η составляет 0.3% , излучаемая световая мощность 0.2 мВт , то возможно достижение следующего уровня мультиплексирования:

$$M = (J \cdot V_a \cdot \eta \cdot A^2) / W = 302400,$$

что соответствует VGA разрешению. Для 10 мс цикла, временной отклик пикселя должен быть ~ 30 наносекунд, что легко достигается в кремниевых светоизлучающих диодах.

Конечно, для практической разработки можно использовать стандартные драйвера управления пассивной матрицей, которые не требуют такого большого уровня мультиплициро-

вания, но это просто эффектная демонстрация исключительных параметров кремниевых светоизлучающих диодов и возможности создания микродисплеев на их основе.

На рис. 5 схематически изображен проект пассивно-матричного микродисплея, с интегрированными драйверами строк/столбцов и кремниевыми светоизлучающими элементами. Разрешающая способность дисплея 128×128 пикселей при 16 внешних выводах.

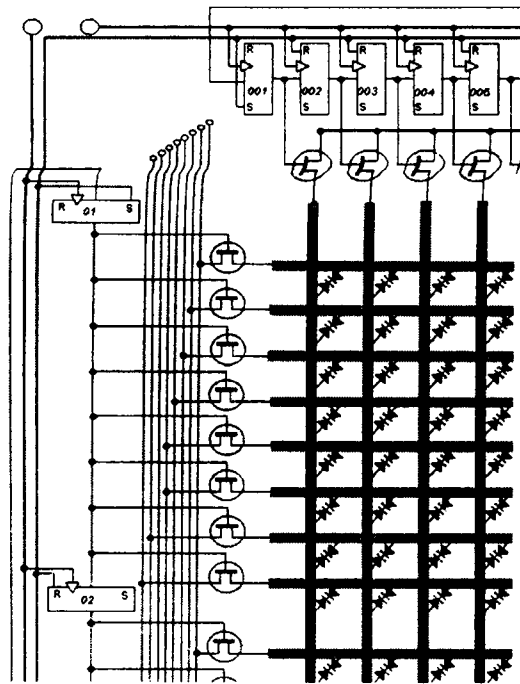


Рис. 5. Схема пассивно-матричного микродисплея с интегрированными драйверами строк и столбцов (фрагмент)

Одна из главных проблем кремниевого пассивно-матричного микродисплея это падение напряжения из-за высоких рабочих плотностей токов. Вычисления показывают, падение потенциала на питающей шине высокоинформативного дисплея может достигать нескольких вольт. Специальная конструкция электродной системы, позволяющая максимально снизить омическое падение напряжения на шинах строк и столбцов пассивной матрицы кремниевых светодиодов, изображена на рис. 6.

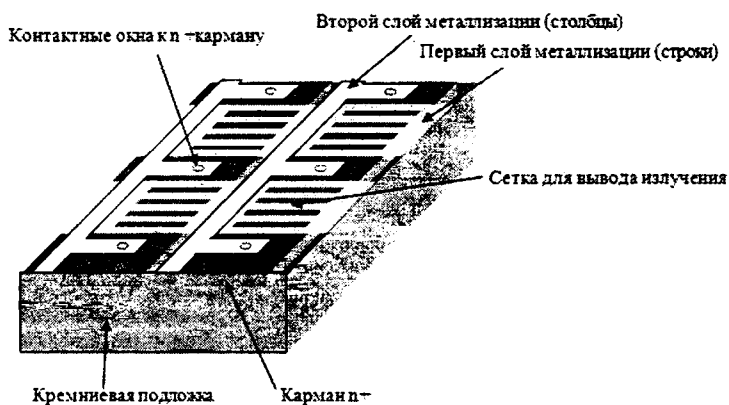


Рис. 6. Конструкция электродной системы

Заключение

Светоизлучающие пассивно-матричные микродисплеи на основе кремниевых светодиодов становятся реальными конкурентами на рынке устройств отображения информации. Уникальность параметров кремниевых светоизлучающих диодов позволяет конструировать недорогие высокоинформативные дисплеи.

LIGHT EMISSIVE MICRODISPLAYS BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON

P.V. JAGUIRO, A.V. VYSOTSKI, P.S. KATSUBA, P.F. SERBUN AND A.G. SMIRNOV

Abstract

Standard silicon microelectronics technology is very attractive for use in microdisplays, because it is the shortest way to highest pixel densities and integration of matrix with column and row drivers into a common chip. Use of nanostructured silicon light emitting diodes (SiLEDs) may completely solve the problem of low compatibility of display elements and silicon chip. At present time the most suitable kinds of Si-LEDs are porous silicon avalanche LEDs. They have such advantages as long operation lifetime (> 10000 hours), continuous spectrum, which allows to filter RGB colors, operation voltages less than 12 volts and extremely sharp VA-curve, fast response time (~ 1 ns), high operation current densities. Rather low energy efficiency (<1%) is not so significant for NTE microdisplays. This paper considers the background, approaches and achievements in investigation of the light emission mechanism, design of the silicon based LEDs and high resolution matrix displays.

Литература

1. *Chynoweth A.G., McKay K.G.* // Phys. Rev. 1956. Vol. 102. P. 369.
2. *Zhang X.* Electrochemistry of Silicon and Its Oxide, NY, 2001.
3. *Canham L. (edited).* Properties of Porous Silicon, EMIS Datareviews Series. No.18, London, 1997.
4. *Geloz B., Koshida N.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 4319.
5. *Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S.* Et al // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 68. P. 1646.
6. *Jaguiro P., Ferrari A., Lazarouk S.* // Proc. Electrochem. Soc. 1998. Vol. PV 97-29. P. 194-205.
7. *Zhao J., Wang A., Truke T., Green M.* // MRS Proceedings. 2002. Vol. 744. P.4-7.
8. *Pankov J.* Optical processes in semiconductors. Prentice-Hall, New Jersey, 1971.
9. *Newman R.* // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 700-703.
10. *Bisi O., Ossicini S., Pavesi L.* // Surface Science Reports. 2000. Vol. 38. P. 1-126.
11. *Sze S.* Physics of Semiconductor Devices, NY, 1981.
12. *Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Smirnov A.* // Acta Physica Polonica A. 2007. Vol. 112, No. 5. P. 1037-1042.
13. *Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Prohorenko A.* // Proceedings Electrochemical Society. 1998, Vol. PV 97-29. P. 456-460
14. *Lazarouk S.; Jaguiro P.; Leshok A.; Borisenko V.* // Bull.Russian Acad.Sci., Phys. Ser. 2002. Vol. 66. N 2. P. 179-182 (in Russian).
15. *Jaguiro P., Lazarouk S., Pavesi L., Smirnov A.* // Proceedings of the International SID Symposium "Advanced display technologies", Minsk. 2001. Vol. 10. P. 112.
16. *La Monica S., Maiello G., Ferrari A., Masini G., Lazarouk S., Jaguiro P., Katsuba S.* // Thin solid films. 1997. Vol. 297. P. 265-267.