

УДК 621.315.5.592.3

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

С.К. ЛАЗАРУК, А.А. ЛЕШОК, П.В. ЖАГИРО, В.Е. БОРИСЕНКО

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

*Поступила в редакцию 23 октября 2003*

Проанализировано развитие светоизлучающих диодов на основе наноструктурированного пористого кремния. Рассмотрены электрофизические свойства изучаемых светодиодов и физические явления, определяющие эти свойства. Обсуждены перспективы использования наноструктурированного пористого кремния в оптоэлектронных интегральных схемах.

*Ключевые слова:* пористый кремний, светодиод, оптические межсоединения.

### Введение

Кремний, будучи основным материалом микроэлектроники, не нашел широкого применения в оптоэлектронных интегральных схемах из-за непрямозонного характера его запрещенной зоны. Однако после обнаружения эффективной фотолюминесценции в пористом кремнии (ПК) появилась надежда развития и кремниевой оптоэлектроники [1-3]. Особенно это актуально для создания оптических межсоединений в кремниевых чипах, так как традиционные металлические межсоединения по причине РС-задержек не способны работать в гигагерцевом диапазоне частот.

Основная проблема реализации кремниевых оптических межсоединений связана с изготовлением эффективного светоизлучающего элемента. Достижения последних лет убеждают в перспективности использования светодиодов на ПК для этих целей. Нами экспериментально показано, что такие светодиоды способны работать с эффективностью более 1 % [4] при стабильности светоизлучения более 1000 ч [5]. Временные задержки при этом составляют несколько наносекунд [6]. Достигнутый уровень параметров позволяет рассматривать такие устройства как перспективные для развития кремниевой оптоэлектроники.

В данном обзоре нами проведен анализ развития светоизлучающих диодов на ПК, обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований и рассмотрены возможности их практического использования в электронике. Особо следует отметить, что большая часть работ и обзоров [7] по светодиодам на пористом кремнии посвящена приборам, работающим при прямом смещении, в то время как лучшие значения эффективности [3, 4], стабильности [5] и быстродействия [6, 8] светоизлучения были получены при обратном смещении в режиме лавинного пробоя контакта металл-ПК. В связи с этим в данной работе основное внимание уделено именно лавинным светодиодам на основе ПК.

### Состояние проблемы

Первые светодиоды на пористом кремнии были продемонстрированы немецкими учеными в 1991 г. [9]. ПК был сформирован на кремниевой подложке  $n$ -типа проводимости. Полупрозрачный золотой электрод, осажженный на ПК, обеспечивал выпрямляющий контакт Шотт-

ки. Излучение наблюдалось при обоих полярностях смещающего напряжения с максимумом интенсивности на длине волны 650 нм. Особо авторы отметили, что эффективность излучения при отрицательном напряжении смещения превышала аналогичную величину при прямом смещении. Квантовая эффективность этих светодиодов находилась в диапазоне  $10^{-5}$ - $10^{-6}$ , а время жизни составляло от 45 мин до 100 ч, после чего имели место деградация параметров и затухание электролюминесценции [9, 10].

Значительное улучшение эффективности и стабильности лавинных светодиодов было достигнуто в 1995 г. благодаря формированию частично окисленного ПК анодированием в переходном режиме [11]. В этом случае пассивирующий слой оксида на поверхности ПК, а также дополнительный пассивирующий слой анодного оксида алюминия поверх пленки ПК обеспечивали стабильную работу лавинных светодиодов более 1000 ч. Квантовая эффективность светоизлучения в контакте Шоттки на основе алюминиевого электрода и пленки ПК составила  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  [5, 12].

В 1998 г. конструкция светодиода на основе частично окисленного ПК была модернизирована группой из Австралии [13]. Замена непрозрачного алюминиевого электрода на полупрозрачный серебряный электрод позволила увеличить эффективность лавинного светодиода до  $0,5 \cdot 10^{-2}$  [13].

В 2000 г. японские исследователи сообщили о создании обратнорасположенного светодиода на основе частично окисленного ПК с квантовой эффективностью  $1,1 \cdot 10^{-2}$  [3]. Увеличение эффективности было достигнуто за счет модернизации технологии изготовления светодиодов. В частности, дополнительная операция электрохимического анодного окисления была использована, чтобы избирательно уменьшить размеры кремниевых наночастиц до значений, при которых проявляется эффект квантового ограничения, и тем самым достичь более однородного распределения размеров кремниевого "скелета" [3].

Недавно было показано, что эффективность  $1,2 \cdot 10^{-2}$  может быть достигнута за счет использования импульсного режима работы светодиода [4]. Импульсный режим позволяет избежать эффектов терморазогрева структуры, приводящих как к снижению эффективности, так и к катастрофическим разрушениям диодных наноструктур [4].

Следует отметить, что на пути совершенствования параметров светодиодов (рис. 1) все группы исследователей использовали предшествующий опыт и модернизировали отдельные детали конструкции или технологию. Так, все лавинные светодиоды были получены на кремниевой подложке *n*-типа, что объясняется более высоким значением барьера Шоттки на этом материале по сравнению с *p*-типом [14]. Далее были выбраны подложки с максимальным уровнем легирования для достижения минимального последовательного сопротивления светодиодов [5] и после 1995 г. все группы использовали этот материал в качестве исходного. Технологический процесс изготовления пористого кремния должен обеспечивать однородное распределение размеров кремниевых наночастиц при толщине слоя не более 1 мкм [5]. Поэтому использовался процесс частичного окисления пористого кремния для пленок субмикронных толщин [3-6].

Кроме рассмотренных выше конструкций, следует отметить и другие, которые, хотя и не обладают рекордными параметрами, важны с точки зрения их практического применения. Так, лавинные светодиоды могут быть сформированы на различных видах кремния, включая пористые слои на поликристаллическом [15] и аморфном кремнии [16]. К тому же такие светодиоды были сформированы на прозрачных подложках, в частности на сапфировых [17] и стеклянных [18].

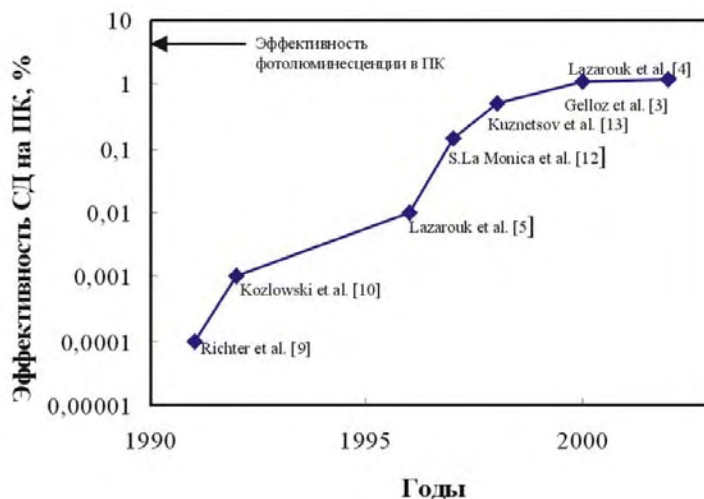


Рис. 1. Рост эффективности лавинных светодиодов на основе нанокристаллического ПК по мере их совершенствования

### Электрофизические свойства лавинных светодиодов на ПК

Ниже будут представлены электрофизические свойства лавинных светодиодов на основе ПК и обсуждены явления в исследуемых наноструктурах. Процесс изготовления исследуемых структур подробно был описан в работе [5], поэтому мы приведем лишь основные технологические этапы. Светоизлучающие диоды формировали на кремниевых подложках *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см. ПК толщиной 0,5-1,0 мкм получали анодированием в 1 %-ном водном растворе плавиковой кислоты при плотности тока формовки 4 мА/см<sup>2</sup>. В процессе анодирования рабочая поверхность кремниевой подложки освещалась вольфрамовой лампой мощностью 100 Вт с расстояния 10 см. Толщина пленки ПК составляла 1 мкм. На поверхность пористого слоя осаждали пленку алюминия, после чего при помощи операций фотолитографии и сквозного электрохимического анодирования алюминия формировали металлические электроды площадью 0,3 мм<sup>2</sup>. Структура сформированного таким образом прибора показана на рис. 2. Для записи спектров фото- и электролюминесценции использовали соответственно кремниевый и германиевый фотоприемники для видимого и инфракрасного диапазонов.

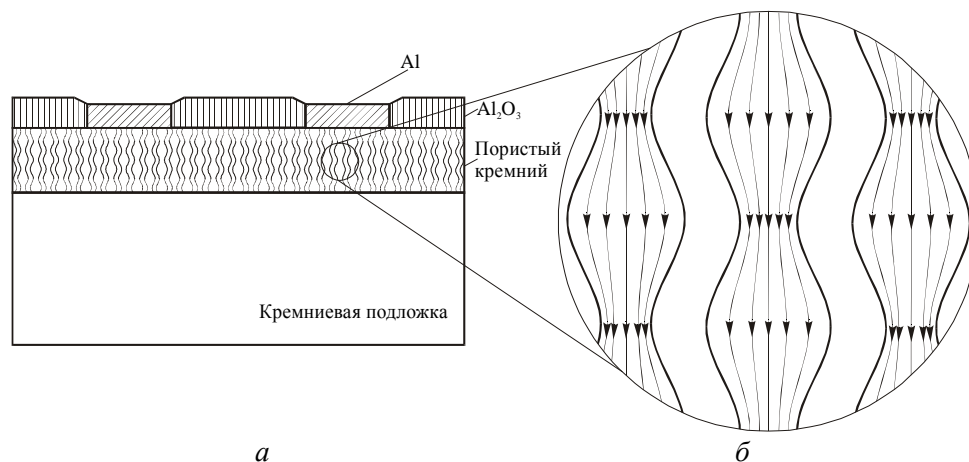


Рис. 2. Светоизлучающий диод на основе пористого кремния (а) и схематичное распределение силовых линий электрического поля в пористом кремнии *n*-типа (б)

Измерение вольтамперных характеристик сформированных структур показало устойчивые выпрямляющие свойства контактов. При смещении в 1 В коэффициент выпрямления достигает величины 2000, что позволяет говорить о наличии барьера Шоттки между ПК и алюминиевыми электродами. Специально следует отметить, что интенсивность электролюминесценции при обратном смещении значительно превосходит аналогичную величину при прямом смещении. Причем эта особенность наблюдалась как для первых светодиодов на основе Шоттки контакта металл-ПК [7], так и в сообщении [3], где достигнута внешняя квантовая эффективность более 1 %. Такой эффект является необычным для традиционных светодиодов на основе однородных полупроводниковых материалов, у которых инжекция неосновных носителей при прямом смещении обеспечивает более высокую эффективность светоизлучения по сравнению с механизмами инжекции при обратном смещении [19]. По нашему мнению, такое несоответствие может быть объяснено уникальной регулярной структурой пористого кремния *n*-типа. Как показано на рис. 2,б, структуру ПК *n*-типа можно представить как регулярную цепь нанокристаллитов с размерами, достаточно малыми для проявления эффекта квантового ограничения (менее 5 нм), и с размерами, где данный эффект не наблюдается (более 5 нм) [20]. При распространении электрического поля через такую структуру в нанокристаллитах минимального размера будет наблюдаться эффект "сгущения" силовых линий, т. е. эффект локального увеличения напряженности электрического поля в этих местах. Как известно, высокая напряженность электрического поля является причиной возникновения "горячих" носителей заряда, вызывающих эффекты ударной ионизации и лавинного умножения, в результате чего происходит генерация электронно-дырочных пар и их последующая рекомбинация с испусканием фотонов. Таким образом, регулярная структура ПК *n*-типа обеспечивает условия, благоприятные для развития эффектов ударной ионизации, чего нет в полупроводниковых материалах с однородной структурой.

На рис. 3 представлены спектры фото- и электролюминесценции исследуемых структур. Спектры электролюминесценции измерялись для различных значений обратных токов через светодиоды. Спектр фотолюминесценции находится в видимом диапазоне и имеет максимум на длине волны 575 нм, в то время как спектры электролюминесценции имеют два пика на длине волны 650 и 1150 нм, перекрывая как видимый, так и инфракрасный диапазоны. Различия спектров фото- и электролюминесценции в видимой области может быть объяснено особенностями электролюминесценции при лавинном пробое полупроводников. В частности, сдвиг пика электролюминесценции в низкоэнергетическую область является типичным для всех полупроводниковых материалов [21]. Также типичными для лавинных светодиодов являются широкие спектры электролюминесценции, так как наряду с рекомбинационными переходами зона-зона имеют место внутризонные переходы носителей заряда с высокоэнергетических на низкоэнергетические уровни. Отсутствие фотолюминесценции в инфракрасном диапазоне объясняется непрямозонной природой светоизлучающих переходов в кремниевых нанокристаллитах больших размеров. В случае электролюминесценции наряду с генерацией электронно-дырочных пар при лавинном пробое имеет место разогрев материала, что вызывает генерацию фононов. Таким образом, появляются условия для светоизлучающих переходов с участием третьей частицы - фонона. Сдвиг пика электролюминесценции на 1150 нм по сравнению с шириной запрещенной зоны кремния 1100 нм, как уже отмечалось, типичен для всех полупроводниковых материалов при лавинном пробое. Измерения спектров электролюминесценции при различных обратных токах показали, что интенсивность излучения в видимом диапазоне пропорциональна квадрату тока, в то время как интенсивность электролюминесценции в инфракрасном диапазоне пропорциональна току. Эта особенность еще раз подтверждает предположение о различных механизмах светоизлучения в видимом и инфракрасном диапазонах.

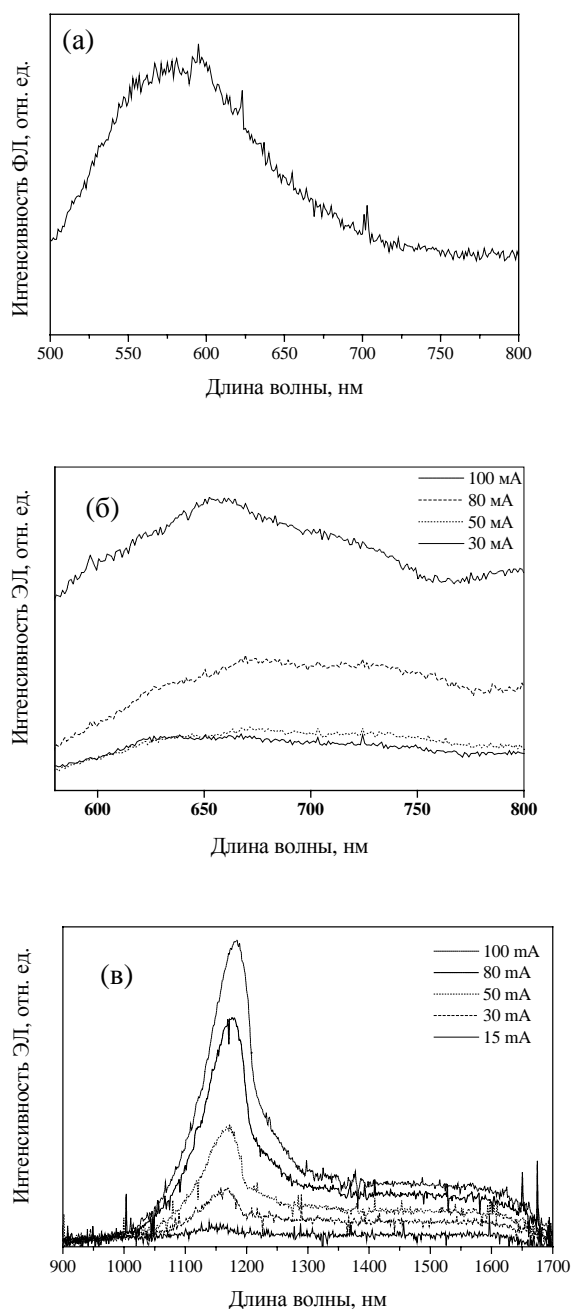


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции (а) и электролуминесценции видимого (б) и ИК (в) диапазонов

электронно-дырочных пар в нанокристаллитах, где проявляется эффект квантового ограничения. Как следует из проведенных исследований, эффективность светоизлучения увеличивается с ростом обратного тока. Однако рост обратного тока ограничивается наступлением необратимого теплового пробоя. Эта проблема может быть решена за счет эффективного отвода джелевого тепла.

На рис. 4 показана энергетическая зонная диаграмма исследуемой структуры, где представлены различные механизмы излучения света, которые могут быть описаны следующей феноменологической моделью. При подаче напряжения обратного смещения (до 3-4 В) на контакт металл-ПК через него протекает незначительный обратный ток экстракции неосновных носителей заряда. По мере роста смещающего напряжения и соответственно электрического поля в исследуемой структуре появляются условия для образования "горячих" носителей заряда, которые при соударении с кристаллической решеткой генерируют электронно-дырочные пары. Учитывая тот факт, что электрическое поле неоднородно по объему пористого кремния (см. рис. 2), можно предположить, что лавинный пробой начинается в местах высокой напряженности электрического поля, т. е. в нанокристаллитах минимальных размеров. При дальнейшем увеличении смещающего напряжения эффект ударной ионизации горячих носителей заряда имеет место по всему объему ПК, вызывая генерацию электронно-дырочных пар как в области присутствия электрического поля, так и в нейтральной части пористого кремния [19]. При этом инициируются следующие механизмы генерации излучения: межзонная рекомбинация электронно-дырочных пар в нанокристаллитах, где проявляется эффект квантового ограничения ( $h\nu_1$ -излучение); межзонная рекомбинация электронно-дырочных пар в более крупных нанокристаллитах при отсутствии эффекта квантового ограничения ( $h\nu_2$ -излучение); внутризонное излучение за счет перехода носителей заряда с высокоэнергетических на низкоэнергетические уровни ( $h\nu_3$ -излучение).

Очевидно, что из всех приведенных механизмов наибольший интерес представляет межзонная рекомбинация

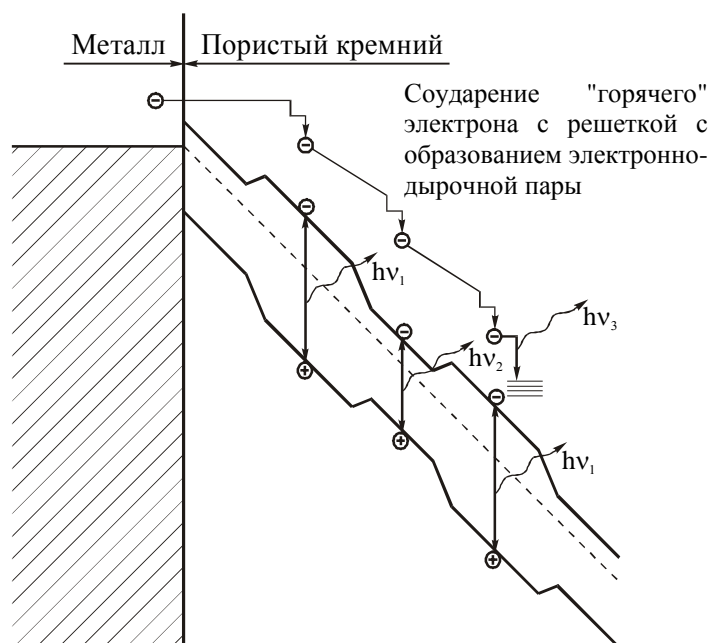


Рис. 4. Диаграмма энергетических зон контакта металл-пористый кремний  $n$ -типа при обратном смещении:  $h\nu_1$  – межзонное излучение видимого диапазона;  $h\nu_2$  – межзонное излучение ИК диапазона;  $h\nu_3$  – внутризонное излучение

### Применение светодиодов на ПК

Одной из наиболее важных областей практического использования светодиодов на основе ПК являются оптические межсоединения внутри кремниевых чипов. Анализ параметров светодиодов для оптических межсоединений был выполнен в работе [22]. Большинство из упомянутых там параметров уже достигнуты в известных диодных структурах на основе ПК. Например, пороговые напряжения и плотность тока для светоизлучения составляют 4 В [15] и  $0,02 \text{ mA/cm}^2$  [13] соответственно; энергетическая освещенность —  $1 \text{ Вт/см}^2$  при импульсном режиме работы [23]; рабочая частота — 200 мГц [6]. Тем не менее, главная проблема, препятствующая практическому использованию таких светодиодов для оптических межсоединений, — это их недостаточная эффективность. В частности, как отмечается в работе [22], требуемый уровень эффективности должен составлять  $10^{-1}$ , т. е. соответствовать уровню эффективности в светодиодах на основе прямозонных полупроводниковых материалов. С другой стороны, если отдельно рассматривать внутричиповые оптические межсоединения, то в отличие от межчиповых они функционируют на расстояниях, значительно меньших — до 1-2 см, т. е. требования к эффективности используемых светодиодов могут быть менее жесткими. Поэтому достигнутый уровень эффективности в лавинных светодиодах на пористом кремнии позволяет рассматривать их практическое применение для частного случая оптических межсоединений, а именно для оптической связи между элементами внутри интегральных микросхем.

Поперечное сечение разработанной системы для оптических межсоединений на основе лавинных светодиодов из наноструктурированного ПК и ее эквивалентная схема схематично представлены на рис. 5, а, б. Разработанная конструкция включает в себя два контакта Шоттки между алюминиевыми электродами и слоем пористого кремния, а также слой анодного оксида алюминия, разделяющий алюминиевые электроды. Один из диодов Шоттки при смещении, превышающем пороговую величину лавинного пробоя, работает как светодиод (СД), второй при смещении менее напряжения лавинного пробоя функционирует как фотодетектор (ФД). Анодный оксид алюминия выполняет двойную роль. С одной стороны, он защищает пористый слой от атмосферного кислорода, а с другой — он выполняет функции световода (СВ), т. е. свет, излучаемый светодиодом, проходит внутри слоя анодного оксида алюминия как по опти-

ческому волноводу, так как внутренняя часть этого слоя имеет коэффициент преломления 1,7 за счет легирования оксидом титана, что превышает аналогичный параметр для чистого оксида алюминия 1,6. При этом ниобиевая пленка, находящаяся поверх алюминиевого электрода, работает как рефлектор, отражающий свет, что способствует его распространению по световоду, как это показано стрелками на рис. 5.

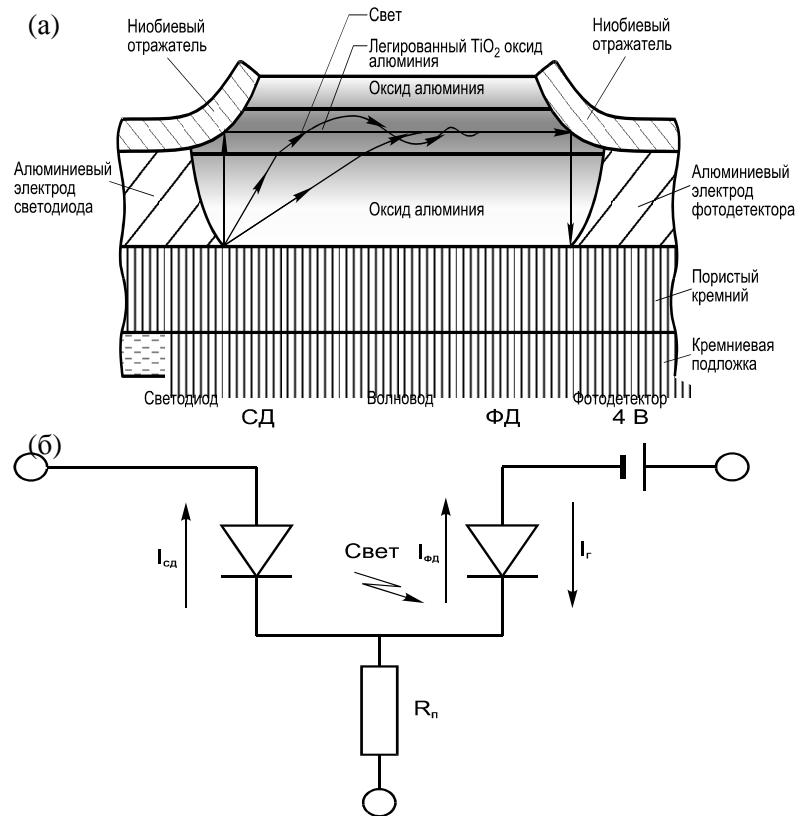


Рис. 5. Поперечное сечение кремниевой интегральной оптоэлектронной ячейки и схема распространения света по  $Al_2O_3$  многослойному волноводу (а) и эквивалентная схема разработанной структуры (б)

Рассмотрим функционирование разработанной системы оптических межсоединений более подробно. При смещении левого диода Шоттки (рис. 5) до напряжения, превышающего напряжение лавинного пробоя (в данном случае 5 В), через диод протекает обратный ток ( $I_{cd}$ ) и излучение света имеет место по периметру алюминиевого электрода. В то же время обратный ток ( $I_{fd}$ ) протекает через правый диод Шоттки, который функционирует как фотодетектор при смещении менее 5 В. Ток через правый диод повышается при увеличении тока светодиода, как показано на рис. 6. Зависимость между  $I_{fd}$  и  $I_{cd}$  близка к квадратичной. Важно отметить, что, как было установлено ранее [24], зависимость интенсивности электролюминесценции и тока в этих светодиодах также квадратичная. Поэтому можно заключить, что регистрируемый ток правого диода Шоттки является фототокчиком на излучение света левого диода.

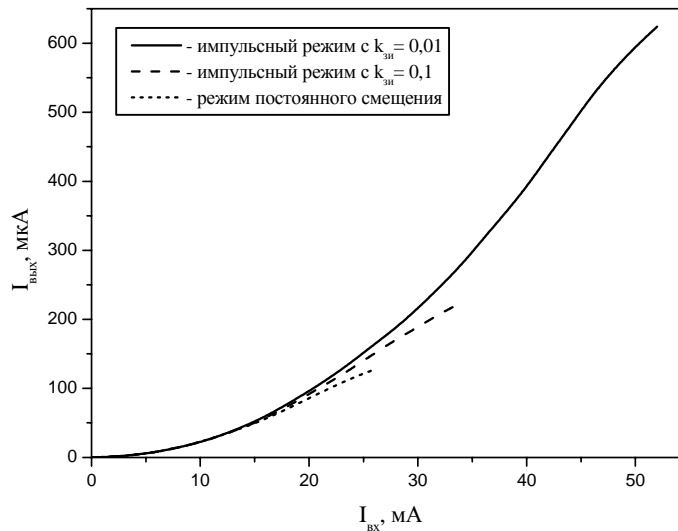


Рис. 6. Зависимость выходного тока фотодетектора от входного тока светодиода при различных режимах смещения светодиода

К сожалению, разработанная конструкция не обеспечивает полной гальванической развязки, так как электрическая изоляция обратносмещенного диода Шоттки не является совершенной. Однако в нашем случае направление тока гальванической связи ( $I_{\Gamma}$ ) противоположно направлению тока фотодетектора. Более того, дополнительное смещение 4 В на фотодетекторе используется для того, чтобы уменьшить влияние паразитной гальванической связи.

На рис. 6 показаны зависимости выходного тока через фотодетектор от входного тока светодиода при разных режимах смещения светодиода. Эта зависимость близка к квадратичной с переходом в линейную при больших значениях входных токов. Важно отметить, что переход исследуемой зависимости в линейную наблюдается при разных величинах входного тока для различных режимов работы светодиода. В частности, при постоянном токе светодиода линейная зависимость наступает при меньших значениях тока. Этот эффект объясняется термическим разогревом светодиода, что увеличивает вероятность безызлучательной Оже-рекомбинации [25]. В подтверждение сказанного выше следует отметить, что при дальнейшем увеличении входного тока наступает необратимый тепловой пробой диодов.

При импульсном режиме работы светодиодов выделяемое тепло рассеивается в интервалах между импульсами, что предохраняет исследуемые структуры от термического разогрева. Поэтому переход в линейную область и необратимый тепловой пробой наблюдаются при более высоких амплитудах входных токов.

Очевидно, что чем меньше коэффициент заполнения импульса ( $k_{зи}$ ), тем меньше термический разогрев диода при одинаковой амплитуде импульса. Поэтому с увеличением скважности удастся достичь работы на максимальных амплитудах токов через светодиод.

На рис. 7 представлена зависимость квантовой эффективности исследуемых светодиодов от входного тока при различных режимах их работы. Эффективность рассчитывалась как отношение выходного тока фотодетектора к входному току светодиода. Максимальная эффективность 1,2 % наблюдается при коэффициенте заполнения импульса 0,01. Именно в этом случае светодиоды способны работать при максимальной амплитуде входных токов. Однако увеличение квантовой эффективности с ростом рабочего тока ограничено. Причем выход на стадию насыщения связан с термическим разогревом диода.



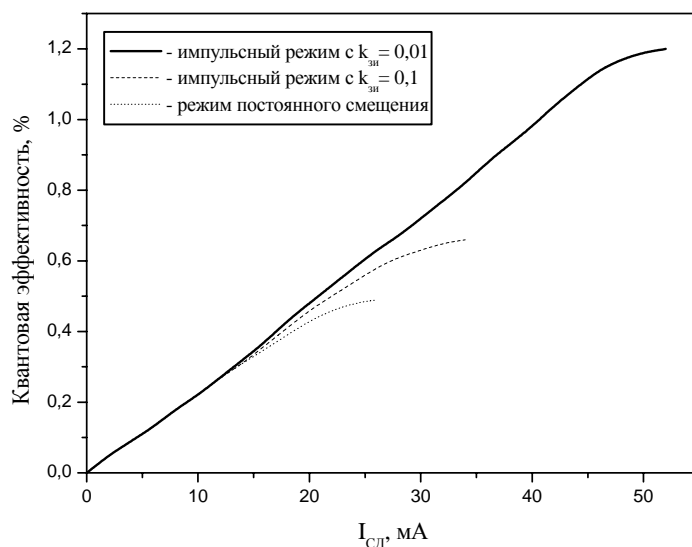


Рис. 7. Квантовая эффективность исследуемых светодиодов в зависимости от амплитуды входных токов при различных режимах питания

Увеличение квантовой эффективности исследуемых лавинных светодиодов по сравнению с нашими предыдущими результатами было достигнуто за счет улучшения теплоотвода. Так, уменьшение площади алюминиевого электрода в 3 раза позволило достичь эффективности 0,5 % при постоянном токе светодиода, что более чем в 2 раза выше полученного ранее значения [26]. Использование импульсного режима работы также позволило улучшить теплоотвод и достичь эффективности светоизлучения 1,2 %, что является лучшим показателем для подобных светоизлучающих устройств [3, 22].

Особое внимание необходимо уделить быстродействию разрабатываемых светоизлучающих устройств. Временной отклик электролюминесценции исследуемых структур с минимизированным последовательным сопротивлением и емкостью барьерного слоя показаны на рис. 8. Основные параметры быстродействия — временная задержка (время между началом электрического сигнала и началом светоизлучения) и время нарастания светового импульса, которые составили 1,2 и 1,5 нс. Минимальный временной отклик наблюдался при максимальном значении амплитуды смещающего напряжения (12 В), как это было уже описано при прямом смещении светодиодов на основе ПК [27]. Однако в отличие от прямосмещенных диоды с обратным смещением имеют меньшее значение диффузионной емкости рассасывания носителей заряда, что значительно увеличивает быстродействие всей системы [19, 6]. Отметим, что полученные временные значения не являются предельными и дальнейшие исследования позволят достичь работы в субнаносекундном диапазоне. Тем более, что время лавинного отклика при ударной ионизации оценивается как величина порядка 1 нс [14].

Таким образом, нами показано, что интеграция светодиода и фотоприемника на единой кремниевой подложке значительно увеличивает эффективность приборов. Разработанная интегрированная система СД-СВ-ФП способна работать в наносекундном диапазоне, обеспечивая преобразование электрического сигнала в световой и обратно с эффективностью порядка 1,2 %, что является перспективным для разработки на ее основе системы внутрочиповых оптических межсоединений.

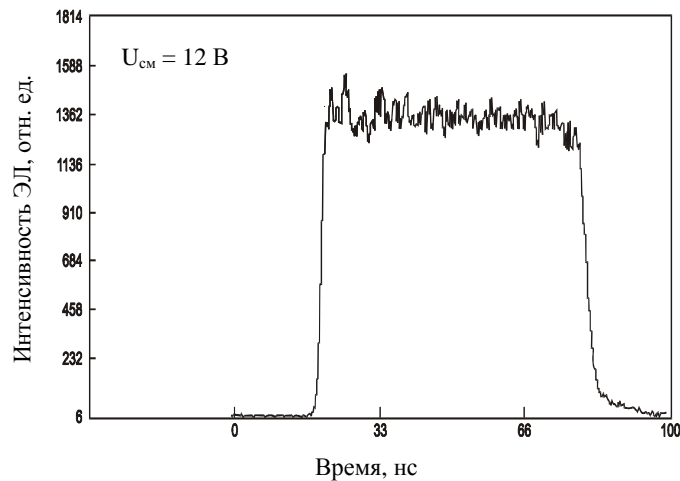


Рис. 8. Временной отклик лавинного светодиода на основе ПК

Кроме оптических межсоединений, светодиоды на ПК могут быть использованы для микродисплейных устройств. В этом случае реализуются следующие преимущества: возможна интеграция схем управления и светоизлучающей матрицы на одном кремниевом кристалле; высокая плотность светоизлучающих пикселей, потому что размер самого пикселя может быть несколько микрон; низкая стоимость и простота изготовления таких микродисплейных устройств. При этом, как уже отмечалось раньше, главным недостатком таких светодиодов остается их низкая эффективность. Учитывая достигнутый уровень квантовой эффективности 1 % или эффективности по мощности 0,3 %, можно оценить термический поток в светодиоде при яркости  $100 \text{ кд/м}^2$  ( $\sim 1 \text{ мВт/см}^2$ ). Это выделяемое тепло  $0,3 \text{ Вт/см}^2$  должно быть рассеяно, чтобы предотвратить перегрев рабочей структуры. Однако если яркость светового излучения ограничить на уровне  $20 \text{ кд/м}^2$  (обычный уровень для головных микродисплеев, функционирующих в затемненном пространстве перед глазами пользователя), то выделяемый тепловой поток не приводит к катастрофическим эффектам из-за перегрева [4]. Такие микродисплейные устройства могут работать в непрерывном режиме более 2000 ч без заметной деградации параметров [4]. При этом микродисплей на основе СД на ПК может включать в себя более миллиона светоизлучающих пикселей на площади  $1 \text{ см}^2$ , что невозможно получить другими микродисплейными технологиями. В этом случае ток через пиксель приблизительно равен 1 мкА, что соответствует рабочим токам через элементы СБИС. В зависимости от режимов формирования ПК можно получить светоизлучение с пиком интенсивности от голубого до красного [22]. А полный спектр излучения - обычно широкий, иногда перекрывает весь видимый диапазон. Такое излучение хорошо подходит для черно-белых дисплеев, в то время как для цветного изображения требуется применение специальных приспособлений, формирующих узкие спектры голубого, зеленого и красного излучений. Наиболее простым решением является использование светофильтров. Альтернативным методом сужения спектров светоизлучения может быть интеграция светодиодов с микрорезонаторами на основе брэгговских зеркал, которые также формируются на основе пленок ПК [28].

### Заключение

Анализ развития светоизлучающих диодов на основе нанокристаллического ПК за последние десять лет показал значительный прогресс в совершенствовании параметров на пути к их практическому применению в оптоэлектронике. Единственная нерешенная проблема — это недостаточная эффективность светоизлучения. Тем не менее, достигнутый уровень эффективности 1 % позволяет рассматривать некоторые специальные применения. В частности, лавинные светодиоды на ПК могут быть использованы для оптических внутричиповых межсоединений. Разработано прототипное устройство оптоэлектронной пары на основе таких светодиодов, которое показало возможность использования фотонов для связи внутри кремниевых чипов. Кроме того, достигнутый уровень эффективности близок к значению, необходимому для рабо-

ты светоизлучающих устройств в микродисплейных матрицах. В этом случае достигается высокий уровень плотности светоизлучающих пикселей, чего нельзя получить другими известными методами. Таким образом, светодиоды на основе наноструктурированного пористого кремния открывают новые возможности для разработки принципиально новых элементов и устройств кремниевой оптоэлектроники.

Приведенные результаты исследований получены при финансовой поддержке межвузовских программ "Нанoeлектроника" и "Низкоразмерные системы", государственной программы "Нанотехнологии" и программы "Коперникус" Европейского сообщества.

## POROUS SILICON LIGHT EMITTING DIODES

S.K. LAZAROUK, A.A. LESHOK, P.V. JAGUIRO, V.E. BORISENKO

### Abstract

The development of nanostructured porous silicon light emitting diodes is analysed. Electro-physical properties of the investigating devices are considered. Prospects for nanostructured porous silicon applications in optoelectronic integrated circuits are discussed.

### Литература

1. *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol.57. P.1046-1048.
2. *Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V.* // Phys. Stat. Sol. (a) 1998. Vol.165. P.87-89.
3. *Gelloz B., Koshida N.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol.88. P.4319-4321.
4. *Lazarouk S.* in "Towards the First Silicon Laser" ed. by Pavesi L. (Kluwer Academic Publishers, Netherland, 2003) P.61-68.
5. *Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Masini G. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol.68. P.2108-2110.
6. *Lazarouk S.K., Jaguiro P.V., Leshok A.A., Borisenko V.E.* // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 2003. Vol.16. P.495-498.
7. *Canham L.T.* Properties of Porous Silicon (INSPEC, London, 1997).
8. *Balucani M., La Monica S., Lazarouk S., Maiello G. et al.* // Solid State Phenomena 1997. Vol.54. P.8-12.
9. *Richter A., Steiner P., Kozlowski F., Lang W.* // IEEE Electron Dev. Lett. 1991. Vol.12. P.691-693.
10. *Kozlowski F., Sauter M., Steiner P., et al.* // Thin Solid Films. 1992. Vol.222. P.196-199.
11. *Bertolotti M., Carassiti F., Fazio E., et al.* // Thin Solid Films. 1995. Vol.255. P.152-154.
12. *La Monica S., Maiello G., Ferrari A., et al.* // Thin Solid Films. 1997. Vol.297. P.261-264.
13. *Kuznetsov V., Andrienko I., Haneman D.* // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol.72. P.3323-3325.
14. *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. М.:Энергия, 1973. С.309.
15. *Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., et al.* // Thin Solid Films. 1996. Vol.276. P.296-299.
16. *Toyama T., Matsui T., Kurokawa Y., Okamoto H., Hamakawa Y.* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol.69. P.1261-1263.
17. *Sercel P., Kwon D., Vilbrandt T., et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol.68. P.684-686.
18. *Lazarouk S.* // Proc. of the 7-th International Symposium Advanced Display Technologies. Minsk, Belarus. 1998. P.193-196.
19. *Верещагин И.К., Ковалев Б.А., Косяченко Л.А., Кокин С.М.* Электролюминесцентные источники света / Под ред. И.К. Верещагина. М.:Энергоатомиздат, 1990. С.117-151.
20. *Calcott P.D.J.* // Properties of Porous Silicon. Ed. by L. Canham. INSPEC, London. 1997. P.203-207.
21. *Haecker W.* // Phys. Stat. Sol. (a) 1974. Vol.25. P.301-324.
22. *Cox T.I.* // Properties of Porous Silicon. Ed. by L. Canham. INSPEC, London. 1997. P.290-310
23. *La Monica S., Balucani M., Lazarouk S., Maiello G., Masini G., Jaguiro P., Ferrari A.* // Solid State Phenomena. 1997. Vol.54. P.21-26.
24. *Lazarouk S., Katsouba S., Tomlinson A., et al.* // Materials Science and Engineering B. 2000. Vol.69-70. P.114-117.
25. *Лазарук С.К., Берашевич Ю.А.* // Изв. Белорус. инж. акад. 2001. № 1(11)/3. С.48-51.
26. *Лазарук С.К., Жагиро П.В., Мельников С.М., Прохоренко А.П.* // Изв. Белорус. инж. акад. 2000. № 1(9)/2. С.69-71.
27. *Cox T.I., Simons A.J., Loni A., et al.* // J. Appl. Phys. 1999. Vol.86. P.2764-2773.
28. *Lazarouk S.K., Leshok A.A., Borisenko V.E., Mazzoleni C., Pavesi L.* // Microelectronic Engineering. 2000. Vol.50. P.81-86.