

Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния

© С.К. Лазарук[¶], А.А. Лешок, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013 Минск, Белоруссия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 16 июня 2004 г.)

Проведено исследование лавинных светодиодов на основе пористого кремния с целью увеличения их эффективности. Максимальная внешняя квантовая эффективность 1.4% была получена при импульсном режиме работы со скважностью импульсов 100, где светодиоды функционируют с наибольшими амплитудами входных токов. Однако увеличение квантовой эффективности с увеличением входных токов ограничено достижением области насыщения, связанной с термическим разогревом диодной структуры.

Современный уровень развития микроэлектроники позволяет создавать элементы кремниевых интегральных схем, способные работать в гигагерцовом диапазоне частот. Однако применяющаяся в настоящее время для соединения этих элементов многоуровневая система металлизации по причине резистивно-емкостных задержек не способна функционировать при таких частотах. Поэтому возникает необходимость замены металлических межсоединений скоростными оптическими. При этом основная проблема реализации кремниевых оптических межсоединений связана с изготовлением кремниевого светоизлучающего элемента, способного работать в гигагерцовом диапазоне. Значительный прогресс по решению этой проблемы был достигнут для светоизлучающих диодов на основе пористого кремния [1–3]. Тем не менее уровень эффективности светодиодов 10%, необходимый для практической реализации оптических межсоединений, остается недостижимым на сегодняшний день. В данной работе представлены результаты по увеличению эффективности светоизлучения в лавинных светодиодах за счет улучшения теплоотвода и импульсного режима работы.

Основные технологические операции изготовления лавинных светодиодов на пористом кремнии и прототипа оптоэлектронной пары на их основе описаны в работах [2,4,5], здесь мы лишь приведем последовательность и описание некоторых ключевых операций.

Кремниевые подложки *n*-типа с удельным сопротивлением 0.01 Омсм использовались в качестве исходного материала. Пористый кремний формировали в 1% водном растворе плавиковой кислоты. Толщина пористого слоя составила 0.5 мкм. Далее осаждали алюминиевую пленку толщиной 1 мкм при помощи магнетронного распыления трех алюминиевых мишеней на установке Оратория-29. При этом во вторую алюминиевую мишень были вмонтированы титановые вставки, так что пленки алюминия, получаемые при ее распылении, содержали 14 ат.% титана. Так как магнетронное осаждение происходило при движении кремниевых пластин под последовательно расположенными тремя магнетронами, концентрация титана постепенно менялась от нуля внизу алюминиевой пленки до 14 ат.% в средней части и затем снова до

нуля в верхней части пленки. Плавность изменения концентрации обеспечивалась за счет совместного осаждения при прохождении пластин между двумя соседними магнетронами. Поверх алюминиевой пленки осаждали ниобиевую пленку толщиной 0.2 мкм. Далее при помощи операций фотолитографии и травления формировали ниобиевую маску. После чего проводили электрохимическое анодное окисление алюминиевой пленки через ниобиевую маску в 5% водном растворе щавелевой кислоты при напряжении 50 В в течение 20 мин. При этом примесные атомы титана также окислялись. Таким образом, была сформирована система из двух лавинных светодиодов на основе контактов Шоттки между пористым кремнием и алюминиевыми электродами. При этом оба диода соединены между собой волноводом из оксида алюминия с сердцевинной, легированной оксидом титана, как это показано на рис. 1, а.

Как было показано нами в предыдущих работах [2,5], если один из диодов имеет обратное смещение, превышающее напряжение лавинного пробоя 5 В, то этот диод излучает свет. При этом второй диод при обратном смещении менее 5 В (в нашем случае 4 В) обладает светочувствительными свойствами и способен принимать световой сигнал первого диода. Следовательно, сформированная приборная структура может рассматриваться как прототип оптических межсоединений на кремниевой подложке. Существенными отличиями данной приборной структуры от аналога, описанного в предыдущей работе [2], являются более короткая длина волновода — 5 мкм между диодами, что уменьшило потери светового сигнала, и уменьшенная площадь алюминиевых электронов — 0.04 мм². Уменьшение площади алюминиевых электродов приводит к снижению рабочего объема светодиода, в котором происходит выделение тепла. Терморазогрев диодной структуры определяется соотношением объема источника тепловыделения и объема всего кремниевого чипа, в котором это тепло распространяется. Следовательно, при одинаковых плотностях электрического тока и при одном и том же объеме кремниевого чипа светодиоды меньшей площади будут разогреваться меньше, и выделенное в них тепло будет рассеиваться более эффективно. Исследования светового отклика и внешней квантовой эффективности

[¶] E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

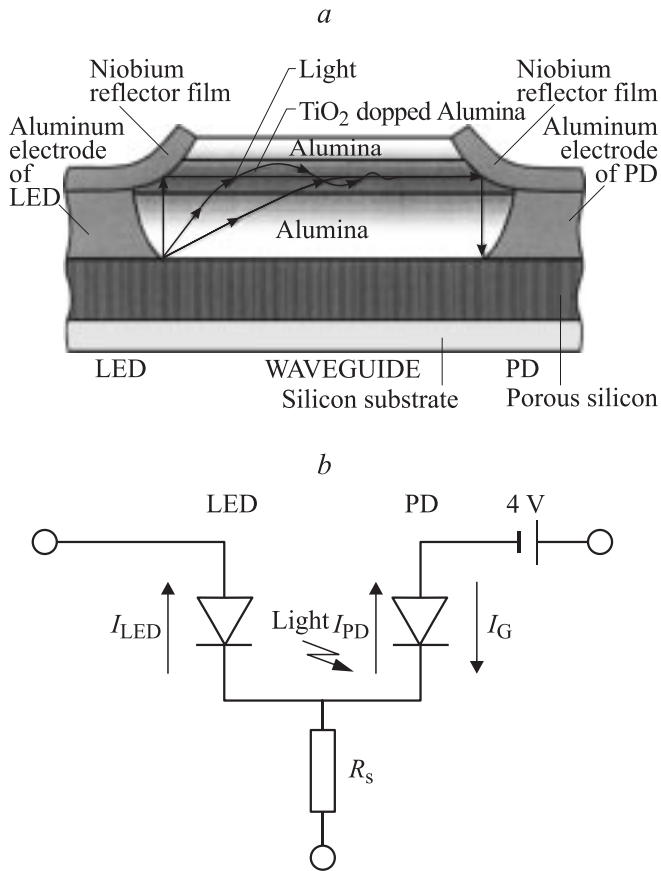


Рис. 1. Поперечное сечение кремниевой интегральной оптоэлектронной ячейки (стрелками показано распространение света по многослойному алюмооксидному волноводу) (a) и эквивалентная схема разработанной интегральной оптоэлектронной пары (b).

светодиодов проводились как в стационарном режиме, так и в импульсном на частоте от 10 Гц до 1 кГц при различной скважности импульсов входного сигнала.

Эквивалентная схема сформированного прототипа оптоэлектронной пары представлена на рис. 1b. В недавно опубликованной нашей работе [2] каждый из компонентов аналогичного интегрального оптоэлектронного устройства светодиод-фотоприемник исследовался по отдельности при помощи внешнего фотодетектора (в случае светодиода), либо внешнего источника света (в случае фотодетектора). При этом были получены такие же зависимости для квантовой эффективности исследуемых светодиодов, и регистрируемые сигналы фотодетектора практически не отличались для внешнего источника света и интегрированных светодиодов. Таким образом, проведенные исследования дают основание считать, что в разработанном оптоэлектронном устройстве регистрируемый фотодетектором сигнал есть отклик на световой сигнал светодиода. Следует отметить, что в разработанном прототипном устройстве оптопары не обеспечивается полная гальваническая развязка, так как электрическая изоляция обратно смещенных

диодов Шоттки не является совершенной, и оба диода расположены на одной и той же кремниевой подложке с сопротивлением R_s . Однако направление тока гальванической связи противоположно току светочувствительного диода, т.е. можно определенно утверждать, что ток фотодетектора в обратном направлении вызван световым сигналом светодиода. Кроме того, регистрация сигнала фотодетектора проводилась в миллисекундном временном диапазоне, соответствующем длительности исследуемых импульсов. Это позволило отделить выходной сигнал от паразитных емкостных токов, длительность которых составляла единицы микросекунд.

На рис. 2 представлены 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 линейный участок наступает при меньших значениях тока, что объясняется термическим разогревом светодиода. В подтверждение вышесказанного следует отметить, что при дальнейшем увеличении входного тока наступает необратимый тепловой пробой исследуемых 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 наблюдается при более высоких амплитудах входных токов.

Очевидно, что чем больше скважность импульса, тем меньше термический разогрев диода при одинаковой амплитуде импульса. Поэтому с увеличением скважности удастся достичь работы на максимальных амплитудах токов через светодиод.

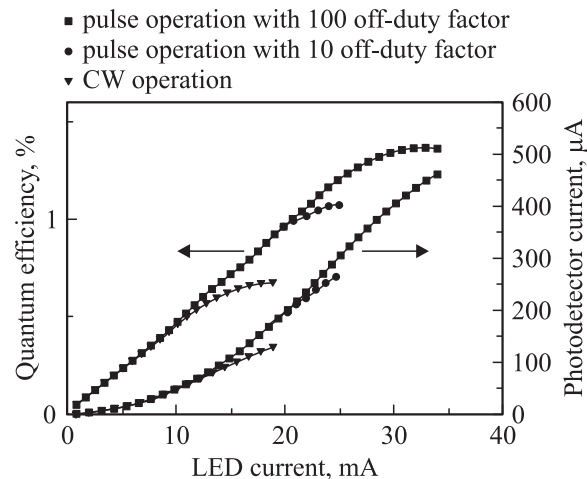


Рис. 2. Зависимость выходного тока фотодетектора и внешней квантовой эффективности исследуемых светодиодов от амплитуды входных токов при различных режимах питания.

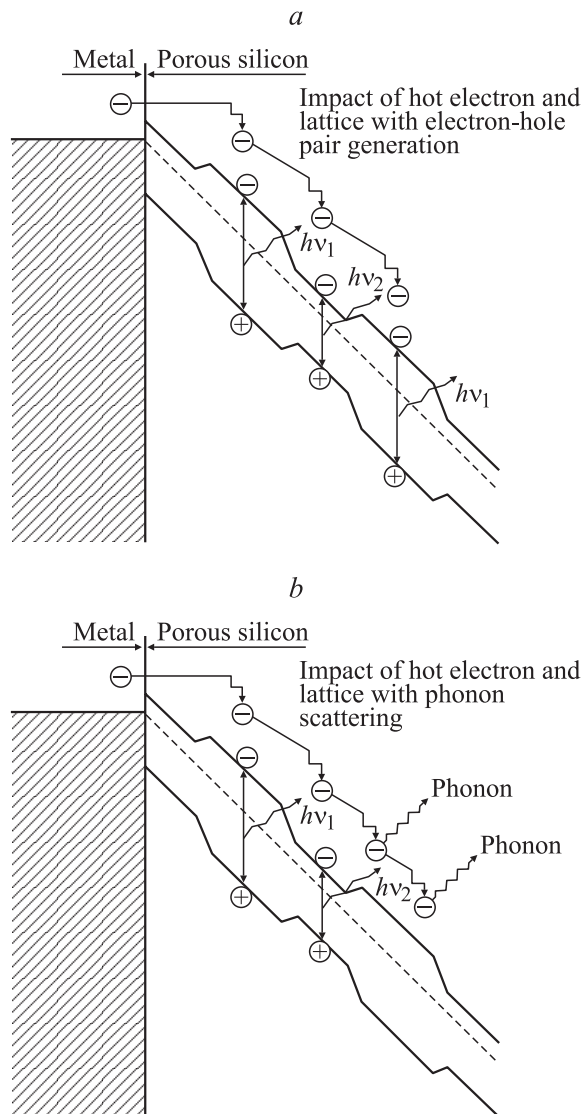


Рис. 3. Зонные диаграммы обратного смещенного контакта металл–пористый кремний при различных рабочих температурах: T_1 (a) < T_2 (b).

Внешняя квантовая эффективность светодиода определяется как отношение числа излучаемых квантов к числу проходящих за то же время через светодиод носителей заряда. При этом большинство излучаемых квантов при их поглощении фотоприемником генерирует ток фотодиода. Поэтому отношение тока фотодиода к току светодиода может рассматриваться как минимальное значение внешней квантовой эффективности светодиода. На рис. 2 (кривая слева) представлена зависимость внешней квантовой эффективности исследуемых светодиодов от входного тока при различных режимах работы светодиодов. Как показано на рис. 2, максимальная квантовая эффективность 1.4% наблюдается при скважности импульсов 100. Именно в этом случае светодиоды способны работать при максимальной амплитуде входных токов. Однако увеличение квантовой эффективности с

ростом рабочего тока ограничено. Причем выход на участок насыщения связан с термическим разогревом диода.

Увеличение эффективности лавинных светодиодов с ростом тока объясняется более эффективным процессом ударной ионизации при более высоких смещающих напряжениях, как это схематично показано на зонной диаграмме рис. 3, a. При этом необходимо отметить следующие механизмы излучения света: межзонная рекомбинация электронно-дырочных пар в нанокристаллитах, где проявляется эффект квантового ограничения ($h\nu_1$ -излучение видимого диапазона); межзонная рекомбинация электронно-дырочных пар в более крупных нанокристаллитах при отсутствии эффекта квантового ограничения ($h\nu_2$ -излучение инфракрасного диапазона) [6]. Однако увеличение тока в светодиодах также приводит к росту рабочих температур, что в свою очередь сокращает длину свободного пробега „горячих“ электронов из-за соударений с решеткой и рассеянием энергии на фононах, как это схематично показано на рис. 3, b. Рассеяние энергии на фононах наряду с безызлучательными процессами оже-рекомбинации [7,8] уменьшают эффективность излучения света в исследуемых структурах.

В заключение отметим, что увеличение внешней квантовой эффективности лавинных светодиодов было достигнуто за счет улучшения теплоотвода в исследуемых структурах. Так, уменьшение площади алюминиевого электрода позволило достичь величины 0.7% при постоянном токе светодиода, что в 2 раза выше полученного ранее значения [2]. Использование импульсного режима работы также позволило улучшить теплоотвод и достичь внешней квантовой эффективности 1.4%, что является лучшим показателем для подобных светоизлучающих устройств [1,3].

Таким образом, показаны пути увеличения эффективности излучения в лавинных светодиодах на пористом кремнии. Можно прогнозировать, что при дальнейшем уменьшении размеров рабочих структур и применении материалов с высокой теплопроводностью, например алмазоподобных пленок, для отвода и рассеивания выделяемого тепла, достигнутое значение квантовой эффективности может быть увеличено в несколько раз. Поэтому лавинные светодиоды на основе пористого кремния могут рассматриваться как перспективные для создания на их основе внутричиповых оптических межсоединений интегральных микросхем.

Список литературы

- [1] P. Calcot. In: *Properties of Porous Silicon*, ed. by L. Canham (London, INSPEC, 1997) Chap. 7.
- [2] S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, A.A. Leshok, V.E. Borisenko. *Physica E: Low-Dim. Systems and Nanostructures*, **16**, 495 (2003).
- [3] B. Gelloz, N. Koshida. *J. Appl. Phys.* **88**, 4319 (2000).
- [4] S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, S. Katsouba, G. Masini, S. La Monica, G. Maiello, A. Ferrari. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2108 (1996).

- [5] S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, A.A. Leshok, V.E. Borisenko. In: *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*, ed. by V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko and V.S. Gurin (Singapore, World Scientific, 1999) p. 370.
- [6] С.К. Лазарук, П.В. Жагино, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко. Изв. РАН. Сер. физ., **66** (2), 178 (2002).
- [7] С.К. Лазарук, Ю.А. Берашевич. Изв. Белорус. инж. акад., **11** (3), 48 (2001).
- [8] Th. Dittrich, V.Yu. Timoshenko, J. Rappich, L. Tsybeskov. J. Appl. Phys., **90**, 2310 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

Efficiency of avalanche light emitting diodes based on porous silicon

S.K. Lazarouk, A.A. Leshok, V.A. Labunov, V.E. Borisenko

Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics,
220013 Minsk, Belarus

Abstract The avalanche porous silicon light emitting diodes have been investigated in order to improve their efficiency. The maximum external quantum efficiency value of about 1.4% has been achieved by the pulse current at the off-duty factor of 100 where the light emitting diode is operated with the largest input currents. But the increase in the quantum efficiency with operating current is limited, the reaching of the saturation stage being connected with the thermal heating of the diode.