

УДК 621.382.232

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОМ КРЕМНИИ

П.В. ЖАГИРО, А.А. ГУБАРЕВИЧ, П.С. КАЦУБА, В.М. САЛИМЬЯНОВ и А.Г. СМИРНОВ

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

Поступила в редакцию 23 апреля 2008

Рассмотрены основные проблемы экспериментального исследования физических процессов в светоизлучающих диодах на пористом кремнии. Проведен краткий анализ соответствующих физических процессов и методов их исследования. Предлагаемые экспериментальные и технологические решения направлены на улучшение воспроизводимости экспериментальных результатов, создание основы для построения адекватных теоретических моделей, а также на практическую реализацию кремниевых светодиодов с улучшенной эффективностью.

Ключевые слова: кремниевые светоизлучающие диоды, электролюминесценция, диод Шоттки, наноструктурированный кремний.

Введение

Как свидетельствует история, люди всегда были озабочены поисками новых источников света, начиная от факела и свечи, газового фонаря и лампочки Эдисона и заканчивая развивающимися и в настоящее время газоразрядными, органическими и кристаллическими излучателями. Так как идеалом технической цивилизации является нечто твердотельное и питающееся от электричества, неудивительно, что полупроводники, ширина запрещенной зоны которых примерно соответствует энергии светового кванта, пришлись как нельзя кстати. Была проведена колоссальная исследовательская работа, в результате которой светодиоды стали одними из лучших источников света, конкурентоспособными почти во всех областях.

Хотя сейчас слово «светодиод» ассоциируется с инжекционными токами в прямозонном полупроводнике, в истории светодиодов были и эффективные непрямозонные полупроводники (например, фосфид галлия), так и неинжекционные механизмы возбуждения (например, ударная ионизация) [1]. Развитие светодиодов шло по пути поиска наиболее эффективных материалов и по мере их выявления, непрямозонные полупроводники и неинжекционные механизмы уходили в область воспоминаний.

Но есть один полупроводник, который не ушел в историю и активные попытки создать коммерческие светодиоды на его основе продолжают уже более 50 лет. Этот полупроводник – кремний. Ввиду своих выдающихся физико-химических, электронных и технологических свойств он является основой современной микроэлектроники. Но он имеет непрямозонную энергетическую структуру и это является труднопреодолимым препятствием для создания источников оптического излучения на его основе.

Электролюминесценция кремния с квантовой эффективностью $\sim 10^{-8}$ впервые была получена в 50-х годах прошлого века [2]. 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 исследований в этой области приведен в [3]. Впрочем, наноструктурированный кремний может быть получен и другими способами.

К настоящему времени у обратносмещенных (лавинных) диодов на наноструктурированном кремнии достигнута внешняя квантовая эффективность 1.4%, что открывает перспективы создания полностью кремниевых intrachip и interchip высокоскоростных оптоэлектронных систем передачи данных, высокоинформативных микродисплеев [4].

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.

В данной работе предпринята попытка охарактеризовать основные проблемы экспериментальной техники исследования электрофизических характеристик кремниевых светодиодов и используемые нами методы их решения.

Проблема локализации области лавинного пробоя

Экспериментально установлено, что наиболее эффективная электролюминесценция лавинных кремниевых светодиодов имеет место при использовании структур типа диодов Шоттки. В качестве электрода могут использоваться слои золота, алюминия, вырожденных полупроводников In_2O_3 , ZnO , поликристаллических Si, SiC и ряда других материалов.

Электрод должен:

- обеспечивать высокоэффективный вывод излучения,
- обладать малым сопротивлением (так как лавинный пробой очень чувствителен к изменениям напряжения и даже небольшое омическое падение потенциала приводит к заметной неравномерности свечения [5]),
- защищать слой пористого кремния от внешних воздействий для получения высокой стабильности и продолжительного срока службы.

К сожалению, в настоящее время не существует электрода, который удовлетворял бы всем поставленным требованиям. Так использование полупрозрачных слоев золота не обеспечивает ни достаточной защиты пористого слоя, ни малости омического сопротивления. Вырожденные полупроводниковые слои не обладают требуемой электрической проводимостью. Помимо того, поликристаллический кремний недостаточно прозрачен, а при использовании In_2O_3 , вследствие электромиграции и высокой реакционной способности пористого кремния, нарушается стехиометрический состав окисла и происходит быстрая деградация пористого кремния.

Традиционно наша группа использует электродную систему $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$. Технологически система формируется путем напыления алюминия и последующим анодированием через фоторезистивную маску.

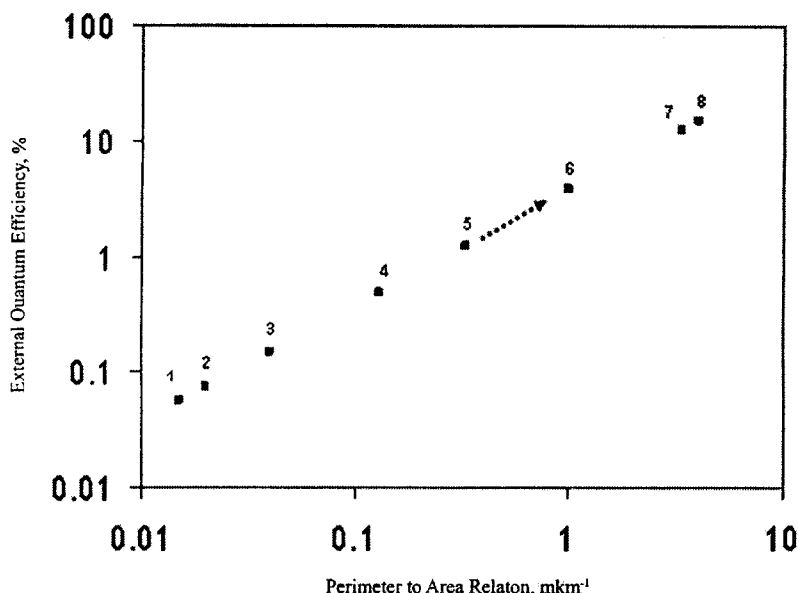
Основными преимуществами данной технологии являются:

- использование низкотемпературных процессов,
- вакуумная очистка слоя пористого кремния,
- 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.

Основной недостаток подобной конструкции – это проблема вывода излучения, так как из-за непрозрачности алюминия свет выходит только по периметру электрода, в то время как проходящий ток пропорционален площади всей электродной площадки [6]. Для увеличения отношения периметр/площадь и соответствующего повышения внешней квантовой эффективности следует уменьшать характерный размер структуры. График с расчетом влияния тополо-

гии и характерного размера структуры на внешнюю квантовую эффективность приведен на рис. 1.



- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 – 0.055% - гребенка 1997-1 | 2 – 0.075% - гребенка 1997-2 |
| 3 – 0.15% - квадрат 100x100 мкм | 4 – 0.5% - гребенка 2006 |
| 5 – 1.2% - квадрат 12x12 мкм 2006 | 6 – 3.8% - квадрат 4x4 мкм |
| 7 – 12.5% - мезоструктура 0.3 мкм | 8 – 15% - наноструктура 0.5 мкм |

Рис. 1. Влияние топологии и характерного размера структуры на внешнюю квантовую эффективность

Однако минимальные размеры структуры ограничиваются размером контактной площадки под разварку ~ 100×100 микрон. Для обхода этого ограничения нами была разработана технология формирования пористого кремния в легированном кармане и размещением контактной площадки на изолирующем окисле, включающая следующие технологические операции:

- нанесение Si_3N_4 , ПХТ Si_3N_4 ,
- ионное легирование бором,
- термическое окисление,
- ионное легирование фосфором,
- анодирование Si в областях карманов n^+ - типа,
- напыление Al + Nb,
- ПХТ Nb,
- анодирование Al,
- ПХТ Nb и Nb_2O_5 ,
- нанесение межслойной изоляции НТФСС, травление НТФСС,
- напыление Al, травление Al.

Проблема влияния сопряженных переходов

Для корректного исследования кремниевого светодиода необходимо измерять параметры соответствующего диода Шоттки. Однако, непосредственное измерение характеристик изолированного диода Шоттки невозможно, так как последовательно с ним включается переход porSi-Si с неизвестными характеристиками (путь А, рис. 2) либо смещенный в противоположном направлении еще один диод Шоттки, также с неизвестными характеристиками (путь В, рис. 2). Выбирая из двух зол меньшее, исследователи обычно пренебрегают наличием искажений из-за перехода porSi-Si , но имеются свидетельства, что влияние этого перехода весьма значительно, в результате чего полученные результаты неверно интерпретируются.

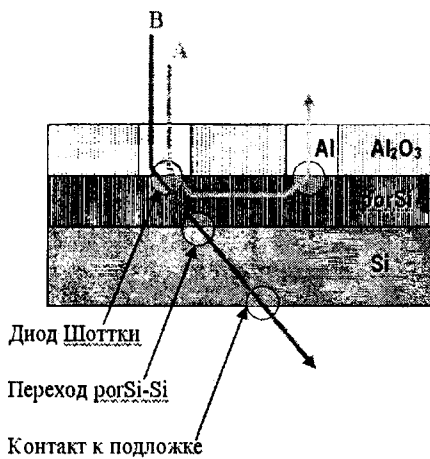


Рис. 2. Схема измерений параметров SiLED

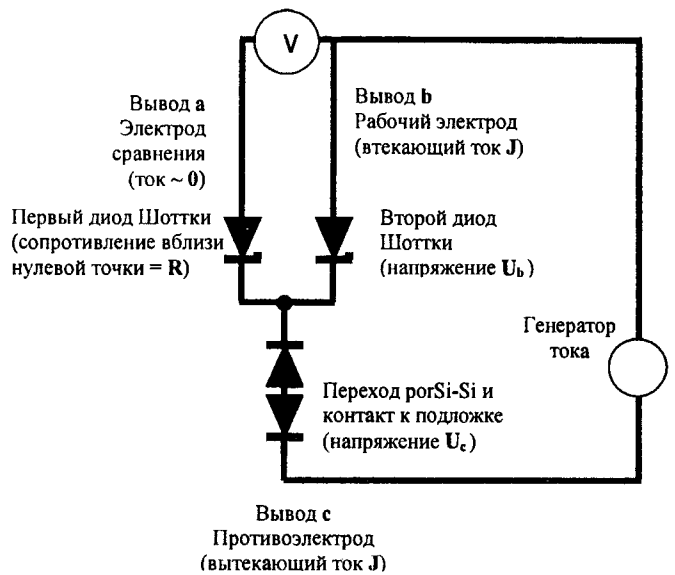


Рис.3. Эквивалентная схема проведения измерений

Для преодоления указанных трудностей нами была разработана специальная методика измерений для многовыводных структур, позволяющая получить вольт-амперные характеристики отдельных элементов. При этом не делается никаких предположений о характеристиках этих элементов, за исключением того, что начальный участок их характеристик (в области сверхмалых токов и напряжений) должен быть линейным. Это не слишком жесткое ограничение, так подобная зависимость характерна для всех типов полупроводниковых приборов.

Эквивалентную схему измерений для многовыводного прибора, например, соответствующую рис. 2, можно представить в виде, изображенном на рисунке 3. При измерении вольт-амперных характеристик следует использовать высокоомный вольтметр (его сопротивление должно быть намного больше сопротивления R начального участка перехода, используемого в качестве электрода сравнения). Если же сопротивление R слишком велико, следует скорректировать результаты, используя стандартную методику, применяемую при измерении напряжений вольтметром с малым входным сопротивлением. Следует отметить, что подобная методика вполне применима и при измерениях планарных структур, не имеющих выхода на подложку.

В качестве иллюстрации использования данной методики на рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики используемых нами кремниевых светодиодов (диодов Шоттки «алюминий-пористый кремний») и рассмотрены их отличия от аналогичных диодов на монокристаллическом кремнии. Конструкция и технология изготовления этих светодиодов описывались ранее [7].

Как видно из экспериментальных данных (снятых при комнатной температуре), фактор неидеальности составляет для прямой ветви ~ 4.5 , а для обратной ветви ~ 3.75 . Столь большие значения фактора неидеальности позволяют сделать вывод, что определяющей является туннельная компонента тока. Для анализа и интерпретации полученных экспериментальных данных обратимся к схематической структуре диода Шоттки (рис. 5) и соответствующей энергетической диаграмме с указанием основных процессов протекания тока при различных смещениях (рис.6). Из рисунков видно, что ширина энергетического барьера снижается как при прямом, так и при обратном смещении. Значения высот и ширин барьеров при различных смещениях приведены в поясняющих надписях на рис. 6. Пренебрегая эффектом Шоттки и полагая барьер треугольным (туннельный ток незначительно зависит от формы барьера), с учетом зависимости проницаемость барьера T от его высоты H и ширины W

$$\ln(T) \sim (-W \cdot H^{1/2}),$$

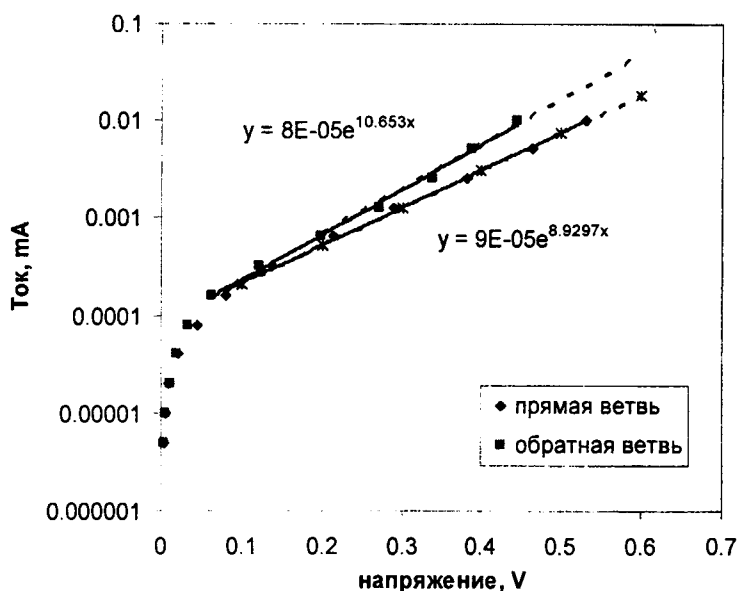


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики кремниевого светодиода (пунктиром показаны теоретические зависимости для $U=3.4$ В)

можно оценить отношение факторов неидеальности (наклонов кривых на рис. 4) для прямой и обратной ветви в зависимости от равновесной высоты барьера U . Отметим, что при подстановке значения 0.58 В, соответствующего высоте барьера алюминий-монокристаллический кремний, фактор неидеальности для обратной ветви получается больше, чем для прямой. В диапазоне смещений $0.1-0.6$ Вольт факторы неидеальности становятся равны лишь при $U=2.6$ В, а наилучшее соответствие с экспериментальными данными наблюдается при $U=3.4$ В.

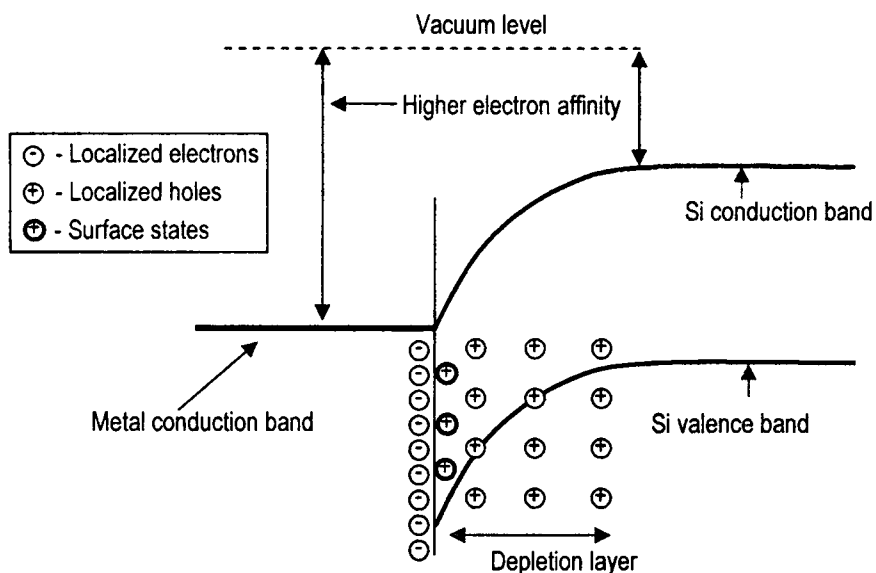


Рис. 5. Структура диода Шоттки – «металл/n+ кремний».

Таким образом, поведение диодов Шоттки при замене монокристаллического кремния на пористый существенно изменяется – уже в области малых смещений начинает доминировать туннельная компонента тока, а высота энергетического барьера на границе раздела значительно увеличивается. Эти изменения могут быть связаны как с изменением энергетической структуры полупроводника, так и с высокой плотностью глубоких ловушек на границе раздела.

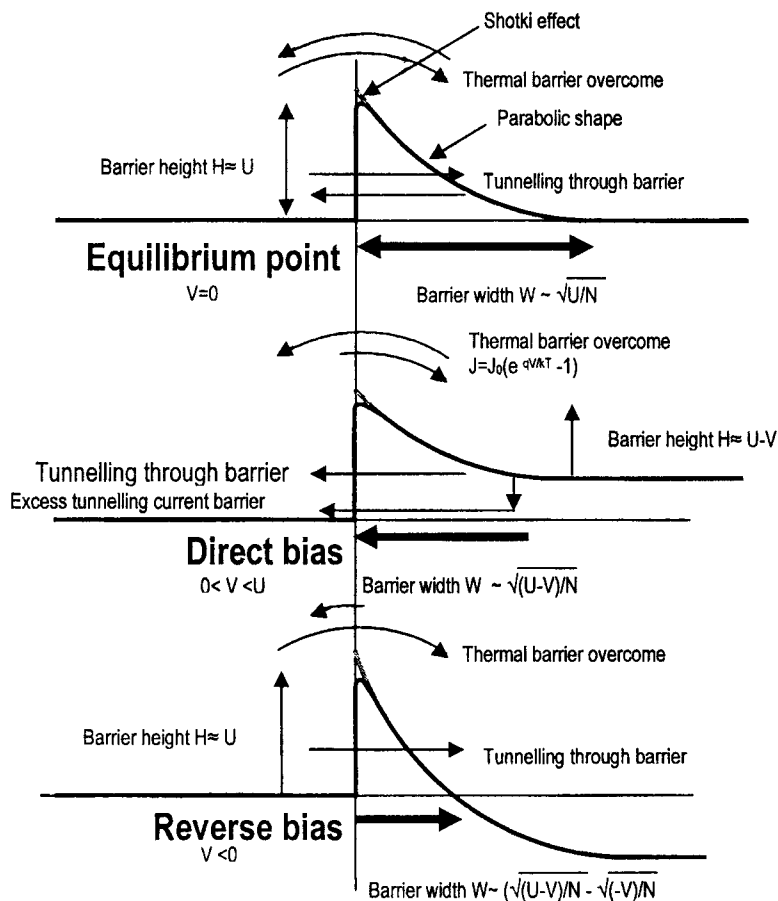


Рис. 6. Энергетические диаграммы для электронов и основные процессы протекания тока при различных смещениях

Проблема разогрева активной области

Лавинные диоды являются одними из наиболее мощных и наиболее быстродействующих полупроводниковых приборов [8]. Не являются исключением и лавинные SiLEDs, рабочие токи которых чрезвычайно высоки ($\sim 1000 \text{ A/cm}^2$ и более). Соответственно, даже в небольших светодиодных структурах потребление тока составляет сотни миллиампер, а выделяемая мощность – единицы ватт. Практически вся мощность выделяется в чрезвычайно тонкой области сильного поля ($\sim 50\text{-}100 \text{ нм}$). В предельных режимах эта локальная область может разогреваться до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ и более, происходит вырождение локальных областей полупроводника, шнурование тока и необратимый пробой перехода. Но даже вдали от предельных режимов разогрев приводит к уходу вольт-амперных характеристик, появлению гистерезиса и плохой воспроизводимости измерений даже при термостабилизации корпуса прибора.

Стандартным методом решения данной проблемы, который и был применен нами, является импульсное возбуждение. Расчет зоны нагрева и теплопередачи в пористый кремний является непростой задачей, поэтому необходимая длительность импульсов определялась экспериментально.

Сначала определялась величина допустимой при измерениях средней рассеиваемой мощности. Для этого измерялось напряжение пробоя диода при комнатной температуре корпуса при рассеиваемой мощности 0.2 Вт . Затем в термостате при температуре $50 \text{ }^\circ\text{C}$ и том же самом токе вновь измерялось напряжение пробоя и рассчитывался температурный коэффициент напряжения (ТКН) пробоя. Теперь при комнатной температуре и зондировании с той же амплитудой тока, но редкими короткими импульсами (т.е. практически без дополнительного

тепловыделения) по изменению напряжения пробоя рассчитывалась исходя из ТКН фактическая температура активной области в стационарном режиме. Для используемого нами 16-выводного корпуса и кристалла, описанного ранее, была получена величина ~ 300 °С/Вт. В процессе измерений средняя рассеиваемая мощность ограничивалась величиной 10 мВт, т.е. средний разогрев активной области не превышал 3 °С.

Затем определялась тепловая инерционность перехода – при возбуждении токовыми импульсами с изменяемой длительностью, спад вершины импульса не должен был превышать величины соответствующей 2 °С, исходя из температурного коэффициента напряжения пробоя. Допустимая для нашей структуры, величина энергии импульса составила ~ 0.5 мкДж.

Схема импульсного генератора и результаты импульсных измерений в области больших токов, при которых в стационарном режиме наступает необратимый пробой перехода, опубликованы ранее [9].

Заключение

Безусловно, перечень проблем, связанных с повышением точности измерений оптических и электрических характеристик лавинных светодиодов на пористом кремнии не исчерпывается рассмотренными в данной статье проблемами. В то же время широкое обсуждение методик измерений, существующих проблем и методов их решения позволило бы улучшить воспроизводимость экспериментальных результатов, создать основу для построения как более адекватных теоретических моделей, так и практических реализаций кремниевых светодиодов с улучшенной эффективностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии»

PHYSICAL PROPERTIES IN LIGHT EMITTING DIODES ON NANOSTRUCTURED SILICON

P.V. JAGUIRO, A.A. GUBAREVICH, P.S. KATSUBA, V.M. SALIMIANOV, A.G. SMIRNOV

Abstract

Here we address the basic problems of the experimental investigation of porous silicon light emitting diodes (LEDs). Short analysis of appropriate physical processes and methods of investigation was carried out. The introduced experimental and technological solutions pointed to enhancement of experimental results reproducibility, creation of basis for adequate theoretical models and design of silicon LED with improved efficiency.

Литература

1. *Pankov J.* Optical processes in semiconductors. Prentice-Hall. New Jersey, 1971.
2. *Newman R.* // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 700-703.
3. *Bisi O., Ossicini S., Pavesi L.* // Surface Science Reports. 2000. P. 1-126.
4. *Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., and Smirnov A.* // Acta Physica Polonica A. 2007. Vol. 112. No 5. P. 1037–1042.
5. *La Monica et al S.* // Solid State Phenomena. 1997. Vol. 54. P. 37-42.
6. *La Monica S., Maiello G., Ferrari A., Masini G., Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S.* // Thin solid films. 1997. Vol. 297. P. 265-267.
7. *Берашев Ю., Лазарук С., Борисенко В.* // Физика и техника полупроводников. 2006. Том 40. С. 234-239.
8. *Sze S.* Physics of Semiconductor devices. Vol. 2. 1981.
9. *La Monica S., Balucani M., Lazarouk S., Maiello G., Masini G., Jaguiro P., Ferrari A.* // Solid State Phenomena - B. 1997. Vol. 54. P. 21-26.