

Фотолюминесценция и ЭПР пористого кремния, сформированного на n^+ - и p^+ -монокристаллах, легированных ионной имплантацией бора или фосфора

© Е.С. Демидов, И.С. Рассолова, О.Н. Горшков, В.К. Васильев, М.О. Марычев,
А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум, С.А. Филиппов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: demidov@phys.unn.ru

(Поступила в Редакцию 16 июля 2007 г.)

В окончательной редакции 10 января 2008 г.)

С применением ионной имплантации фосфора и бора изучено влияние совместного легирования мелкими донорными и акцепторными примесями на усиление квантового выхода фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния (ПК) в видимом и примыкающем к видимому ИК-диапазоне излучения. Неоднородное легирование образцов с последующим окислительным отжигом производилось до и после формирования ПК на сильно легированных до уровня $\approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ мышьяком или бором монокристаллах кремния. Содержание известных P_b -центров безызлучательной рекомбинации контролировалось с применением электронного парамагнитного резонанса. Показано, что существует оптимальное совместное содержание мелких доноров и акцепторов, обеспечивающее максимум интенсивности ФЛ вблизи красного участка спектра видимого света. Согласно оценкам, квантовый выход ФЛ в переходном $n^{++}-p^+$ - или $p^{++}-n^+$ -слое ПК возрастает на два порядка по сравнению с ПК, сформированном на кремнии без ионного облучения.

Работа выполнена при поддержке программы Рособразования (проект РНП 2.1.1 4022).

PACS: 76.30.-v, 76.30.Kg, 78.55.-m, 78.55.Mb, 78.67.Bf

1. Введение

Повышенный интерес к пористому кремнию (ПК) вызван его наноразмерной гетероструктурой, возможностью исследования физики размерного квантования для электронов. Для практического применения он особенно привлекателен в связи с много большей по сравнению со сплошным кремнием эффективностью фото- и электролюминесценции в видимом или ближнем ИК-диапазоне [1–4]. ПК отличается обусловленная его наноразмерной структурой большая эффективная площадь поверхности, в миллионы раз превышающая площадь внешней границы пористого объема. Это приводит к высокой адсорбционной способности ПК, нестабильности его свойств, зависимости от окружающей среды, возникновению центров безызлучательной рекомбинации на границе кремний–оксид кремния в порах и дефектах в пористом слое кремния. Для стабилизации свойств ПК и увеличения эффективности фотолюминесценции (ФЛ) исследовались описанные в обзорах [1–3] разные способы пассивации в окислительной, водородной и других неорганических и органических средах. Важно, что практически в любых вариантах синтеза ПК неизбежно его окисление, и этот материал, кроме воздуха, содержит по крайней мере две фазы — кремний и оксид кремния. В работе [5] была приведена аргументация, согласно которой микропористый кремний представляет собой наночастицы кремния, вкрапленные в диэлектрический оксид кремния. С самого начала исследования ПК сложилось мнение, что мелкие в

сплошном кремнии примеси элементов третьей и пятой групп не влияют на проводимость ПК в связи с увеличением эффективной ширины, запрещенной из-за квантового размерного эффекта и смещения уровня Ферми к середине запрещенной зоны [6,7]. Тем не менее, согласно данным в [1–3], характер формирования ПК при анодном травлении в наиболее часто применяемой смеси $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:1$ зависит от типа проводимости кремния даже на уровне легирования мелкой примесью около 10^{15} cm^{-3} . Наиболее высокий квантовый выход ФЛ в 23% с максимумом интенсивности около 700 nm авторами [8] был получен с применением пассивации в парах воды при повышенных давлении и температуре на кремнии p -типа. В работе [9] было установлено, что спектр электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) так называемых P_b -центров, которые антикоррелируют с ФЛ, являясь центрами безызлучательной рекомбинации [3,4], наблюдается лишь в ПК на слабо легированном мелкими примесями и сильно легированном донорами кристаллах кремния и подавляется в ПК на кремнии с концентрацией бора $\approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Известно также, что легирование бором и фосфором нанокристаллов кремния в матрице SiO_2 существенно влияет на люминесцентные свойства данной системы [10–12]. Специфичная структура ПК практически исключает обычное для сплошного кремния диффузионное легирование мелкими примесями при высоких температурах из-за трудно предотвращаемого дальнейшего окисления наночастиц кремния, что приводит к спектральному смещению и подавлению ФЛ [13]. Поэтому при изучении

влияния примесей на свойства ПК кроме использования исходных легированных монокристаллов применяют пропитку пор солями или органическими соединениями с последующим отжигом. Например, в [14] ПК пропитывался органическими соединениями бора или фосфора, применялись последующее окислительное выжигание при 350°C углерода и водорода и кратковременный (5–10 s) отжиг, обеспечивающий диффузию примеси в кремний в ПК при 1000°C в атмосфере азота. Установлено, что наиболее эффективным для роста выхода ФЛ является совместное легирование В и Р. Получено шести-семикратное увеличение интенсивности ФЛ по сравнению с ПК, прошедшим такую же термообработку, но без дополнительного введения бора или фосфора. Показано, что легирование приводит к уменьшению на два порядка сопротивления диодных структур с прослойкой ПК. Другой приемлемой для ПК альтернативой введения примесей может быть ионное легирование с последующим кратковременным отжигом. Однако этот вариант практически не исследован. Авторами [13] получено почти двукратное увеличение ФЛ с максимумом около 650 nm при облучении малыми дозами (10^{12} – 10^{13} cm⁻²) ионов бора или фосфора с энергией 150–170 keV и последующем отжиге в азоте при 850°C в течение 30 min. В [15] с применением имплантации в ПК большой дозы ионов фосфора изготовлены диодные структуры со сравнительно высокой эффективностью (~ 0.01%) электролюминесценции. Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию возможностей управления свойствами ПК и, в частности, увеличения квантового выхода видимой или примыкающей к видимому диапазону ИК ФЛ с применением ионной имплантации донорной по отношению к кремнию примеси фосфора и акцепторной примеси бора. Особенности нашей работы являются формирование ПК на сильно легированных до уровня $\approx 10^{19}$ cm⁻³ мелкими акцепторами или донорами p^+ - и n^+ -монокристаллах кремния и сравнительно высокие ($\approx 10^{16}$ cm⁻²) дозы ионов, позволяющие на глубине среднего проецированного пробега R_p -ионов на 4–5 порядков превысить исходную концентрацию примеси. Это обеспечивало как возможность в одном слое ПК широких пределов изменения одного типа донорной или акцепторной примеси, так и переход по глубине слоя ПК от сильного акцепторного уровня легирования к сильному донорному уровню. Причем ионная имплантация позволяет обеспечить недостижимый какими-либо другими методами уровень концентрации растворенной в кристалле мелкой примеси. Тем самым предполагалось установить существование оптимального для максимального квантового выхода ФЛ концентрации мелких примесей и нейтрализации ими центров безызлучательной рекомбинации. Для контроля над R_p -центрами безызлучательной рекомбинации, как и ранее при изучении формирования в ПК силицидов магния или эрбия с примесью хрома [16,17], применялась техника ЭПР-спектроскопии. Исследовались два варианта: 1) ионная имплантация фосфором ПК, сфор-

мированного на p^+ - и n^+ -Si; 2) ионная имплантация p^+ - и n^+ -монокристаллов Si бором или фосфором с последующими формированиями ПК и окислительным отжигом. Существенное возрастание интенсивности ФЛ наблюдалось в образцах ПК, сформированных по второму варианту. Установлено, что слои ПК с переходом от донорной к акцепторной электрической активации показывают максимальную интенсивность ФЛ, которая на два порядка превышает таковую в ПК без дополнительного легирования либо легирования лишь одним донорным или акцепторным типом примеси.

2. Эксперимент

Исследования проводились с использованием сильно легированных мелкими примесями до концентрации $\sim 10^{19}$ cm⁻³ пластинчатых монокристаллов кремния с ориентацией (110): n^+ , легированного мышьяком КЭМ 0.003 или сурьмой КЭС 0.01, КЭС 0.007; p^+ , легированного бором КДБ 0.001. Тонкие слои ПК формировались при комнатной температуре анодным травлением в смеси плавиковой кислоты и этилового спирта в соотношении HF:C₂H₅OH = 1:1 при плотности тока 10 mA/cm² в течение 10 min. Высокий уровень легирования мелкими примесями кристаллов кремния позволял без подсветки образцов формировать ПК и в случае n^+ -Si. Согласно интерферометрическим измерениям в видимом свете, толщина ПК при таком режиме на n^+ -Si составляет около 3000 nm, на p^+ -Si — около 1000 nm. После формирования ПК облучался только ионами фосфора с энергией 150 keV и дозой 10^{16} cm⁻². При имплантации бора и фосфора энергия ионов была 100 keV, доза ионов В⁺ составляла $2 \cdot 10^{16}$ cm⁻², ионов Р⁺ — 10^{16} cm⁻². При такой энергии среднепроецированный пробег R_p -ионов В⁺ составляет около 400 nm, ионов Р⁺ — около 100 nm, т.е. в обоих случаях большая часть внедренных ионов оседает в пределах толщины ПК. В том случае, когда ионное облучение производилось до формирования ПК, образцы кремния отжигались 30 min в атмосфере азота при температуре 800°C для устранения радиационных дефектов и стимулирования электрической активности внедренной примеси бора или фосфора. Спектры ФЛ измерялись при комнатной температуре в двух диапазонах длин волн: 650–1000 и 1000–1650 nm при возбуждении аргоновым лазером ($\lambda = 488$ nm); падающая на образец мощность 0.8 W, диаметр светового пятна 0.5 mm. Для регистрации излучения использовалась оптическая схема, включающая монохроматор SP-150 (Stanford Research) с дифракционной решеткой и детектор: ФЭУ-62 в „красном“ и пограничном видимому ИК-диапазоне 650–1000 nm или InGaAs-фотодиод в более дальнем ИК-диапазоне 1000–1650 nm. Спектры ЭПР регистрировались на спектрометре трехсантиметрового диапазона при 77 и 293 K. В качестве эталона использовался порошок MgO с примесью марганца. Поперечный транспорт тока изучался при 293 K по статическим ВАХ

диодных структур с прослойкой ПК и металлическими индиевыми контактами к кремниевой подложке и ПК.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рис. 1 показывает влияние на ФЛ процесса „старения“ ПК при выдержке его при комнатной температуре на воздухе. Как видно, интенсивность ФЛ на p^+ -кремнии возрастает по мере хранения на воздухе, максимум спектра смещается в сторону больших длин волн, вероятно вследствие окисления ПК и исчезновения наиболее мелких наночастиц кремния. ЭПР-спектроскопия, как и в [9], не обнаруживает ответственные за безызлучательную рекомбинацию P_b -центры. В случае n^+ -Si максимальная интенсивность ФЛ наблюдается для свежеприготовленного ПК. По мере выдержки на воздухе происходит гашение ФЛ, вероятно из-за подтверждаемого измерениями ЭПР роста количества P_b -центров безызлучательной рекомбинации. Облучение ионами как бора, так и фосфора привело к исчезновению характерного темно-коричневого или темно-серого цвета ПК. Обесцвечивание не связано с ионным распылением материала так как толщина слоев по данным измерений на оптическом микроинтерферометре не изменилась. По данным электрических измерений поперечная проводимость слоев ПК изменилась меньше, чем на порядок. Значительно более существенным было влияние ионного облучения на ФЛ ПК как на p^+ -Si, так и на n^+ -Si. Как видно из рис. 1, ФЛ почти полностью подавляется обработкой с помощью ионов фосфора. При этом не наблюдалось существенного возрастания интенсивности спектра ЭПР P_b -центров. Дополнительный 30 min отжиг при 800°C

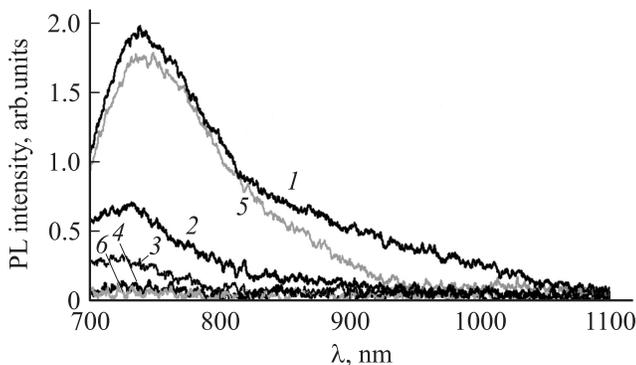


Рис. 1. Спектры ФЛ ПК с различным временем выдержки при комнатной температуре и ПК, подвергнутого облучению ионами фосфора с энергией 150 keV и дозой 10^{16} cm^{-2} : 1 — КДБ 0.001 после 1.5 лет хранения при комнатной температуре, 2 — КЭМ 0.003 после пяти месяцев хранения при комнатной температуре, 3 — свежеприготовленный ПК на КДБ 0.001, 4 — свежеприготовленный ПК на КДБ 0.001, облученный ионами P^+ ; 5 — свежеприготовленный ПК на КЭС 0.01, 6 — свежеприготовленный ПК на КЭС 0.01, облученный ионами фосфора P^+ .

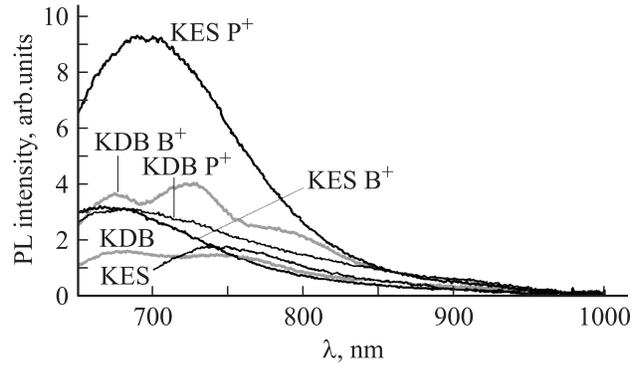


Рис. 2. Спектры ФЛ ПК на кристаллах с ориентацией (110), необлученных и облученных при энергии 100 keV ионами бора B^+ (доза $2 \cdot 10^{16}\text{ cm}^{-2}$) или фосфора P^+ (доза 10^{16} cm^{-2}). KDB — необлученный кристалл КДБ 0.001; KES — необлученный КЭС 0.007; KDB B^+ — КДБ 0.001, облученный ионами бора; KDB P^+ — КДБ 0.001, облученный ионами фосфора; KES B^+ — КЭС 0.007, облученный ионами бора; KES P^+ — КЭС 0.007, облученный ионами фосфора.

в атмосфере азота не увеличил интенсивность ФЛ. Вероятно, ионная имплантация фосфора приводит к возникновению других центров безызлучательной рекомбинации вследствие радиационных нарушений гетероструктуры ПК, которые не устраняются обычным для монокристаллического кремния отжигом радиационных дефектов.

Иная картина наблюдается при применении противоположной последовательности: ионная имплантация — формирование ПК. Как показано на рис. 2, во всех случаях облучения ионами бора или фосфора как n^+ -Si, так и p^+ -Si наблюдается возрастание интенсивности ФЛ. Особенно значительным оно оказывается для ПК, сформированного на предварительно облученном фосфором кремнии КЭС 0.007. В длинноволновой области (в интервале $1000\text{--}1650\text{ nm}$) ФЛ ПК, выращенного на всех образцах кремния, предварительно облученного ионами бора или фосфора, была слабой, почти на уровне шума. У всех образцов, за исключением КЭС 0.007, облученного ионами фосфора, проявился слабый пик ФЛ с максимумом около 1100 nm , вероятно связанный с дислокациями кремния.

Спектры ЭПР ПК на облученном кремнии не показали существенного возрастания содержания P_b -центров или парамагнитных радиационных дефектов кремния. В образцах ПК на кремнии без предварительного облучения в случае p^+ -Si, как и должно быть в согласии с [4,9], P_b -центры не проявляются. В случае n^+ -Si, как показывает опыт, свежеприготовленный ПК обычно тоже не показывает признаков таких парамагнитных центров. Слабый спектр P_b -центров с g -фактором, равным 2.0055 [4], возник лишь в случае ПК на КЭС 0.007, облученном ионами фосфора, и едва заметный на фоне шумов спектр P_b -центров наблюдался в случае ПК также на КЭС 0.007, облученном ионами бора. Все это

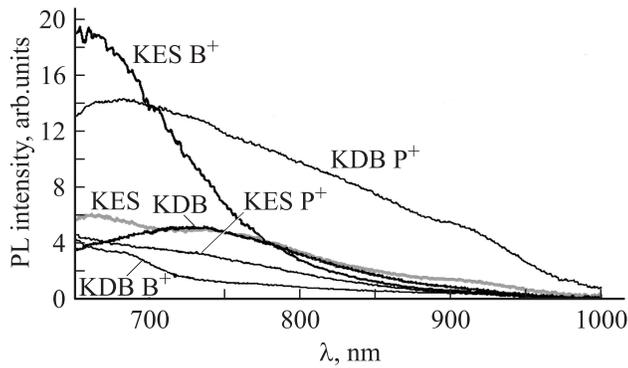


Рис. 3. Спектры ФЛ тех же образцов ПК, что и на рис. 2, после дополнительного отжига на воздухе при температуре 700°C в течение 10 min.

означает, что P_b -центры по крайней мере не препятствуют показанной на рис. 2 ФЛ ПК.

Значительные изменения в спектрах ФЛ ПК, образованного на предварительно облученном ионами бора или фосфора кремнии, произошли после дополнительного окислительного отжига на воздухе при температуре 700°C в течение 10 min. По-видимому, окислительный отжиг привел к удалению остатков электролита и адсорбированной воды. Этому же способствовало частичное окисление кремния в ПК, которое стабилизировало границу кремний-оксид кремния, что привело к усилению влияния примесей бора и фосфора на электронные состояния в пористой гетероструктуре. Как видно из рис. 3, наиболее интенсивная ФЛ имеет место в случаях, когда ПК формировался на образцах с $p-n$ -переходом, т.е. на кремнии КЭС 0.007, облученном ионами бора, или КДБ 0.001, облученном ионами фосфора. Этот результат, в согласии с данными авторов [14], применивших химическое легирование ПК бором и фосфором, показывает, что наблюдавшееся совместное существование мелких доноров и акцепторов обеспечивает оптимальное положение уровня Ферми в ПК и максимум интенсивности ФЛ вблизи красного участка спектра видимого света. С позиций физики квантового размерного эффекта разница в спектрах КЭС, облученного бором, и КДБ, облученного фосфором, на рис. 3 свидетельствует о широком разбросе в размерах наночастиц кремния, наличии сравнительно крупных наночастиц при формировании ПК в КДБ 0.001 и о меньшем разбросе размеров более мелких наночастиц при формировании ПК в КЭС 0.007.

По сравнению с ПК на кремнии без имплантации бора или фосфора действительный квантовый выход ФЛ оптимальной области структур $n^{++}-p^+$ или $p^{++}-n^+$ должен быть много больше, чем на рис. 3. Толщина переходной области от слоя, где превалирует акцепторная примесь к слою, где доноров больше, чем акцепторов, много меньше толщины ПК. Если считать, что эта переходная область имеет толщину порядка области

пространственного заряда L_D , как и в объемном кремнии, то в случае КЭС 0.007 с концентрацией доноров сурьмы $\approx 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ $L_D \approx 100\text{ nm}$, что в 30 раз меньше толщины (около 3000 nm) всего слоя ПК на $n^+-\text{Si}$. С учетом трехкратного отношения максимумов ФЛ ПК на облученном и необлученном бором кремнии КЭС 0.007 на рис. 4 получаем, что квантовая эффективность в переходной $p^{++}-n^+$ -области на два порядка выше таковой в ПК на необлученном кремнии. Квантовая эффективность в переходной $n^{++}-p^+$ -области в ПК, сформированном на облученном фосфором кремнии КДБ 0.001, также на два порядка превышает таковую в ПК на необлученном кремнии p^+ . Акцепторный фон $\approx 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ дает оценку $L_D \approx 30\text{ nm}$ для КДБ 0.001, что приблизительно в 30 раз меньше толщины слоя ПК на $p^+-\text{Si}$ (1000 nm). Также имеет место почти трехкратное отношение максимумов ФЛ на рис. 3.

Отметим, что в отличие от $p-n$ -перехода в объемном монокристаллическом кремнии повышенная квантовая эффективность $n^{++}-p^+$ или $p^{++}-n^+$ -переходного слоя в ПК, вероятно, не связана с существенным участием генерируемых внешним лазерным возбуждением носителей тока в прилегающих к переходному слою областях. При пористости в наших слоях около 50%, вкрапленных в оксид кремния наноразмерных частицах кремния и такого же порядка расстояниях между ними диффузионная длина неосновных носителей тока вряд ли превышает единицы нанометров и существенно меньше оцененной выше толщины переходного слоя в 30 или 100 nm.

Спектры ЭПР тех же отожженных при 700°C в течение 10 min образцов, приведенные на рис. 4, показывают, что в ПК на необлученном кремнии, как и в наших прежних экспериментах [16,17], в случае $n^+-\text{Si}$ возник стимулированный окислительным отжигом сравнительно интенсивный спектр P_b -центров. В случае же $p^+-\text{Si}$, как дополнительно нелегированного, так и облученного ионами бора, высокое содержание акцепторов приводит к тому, что они почти не наблюдаются на фоне шумов, по-видимому, из-за изменения их зарядового состояния. Из рис. 4 видно, что ионная имплантация фосфора почти не изменила интенсивность ЭПР P_b -центров по сравнению с ПК на нелегированном дополнительно

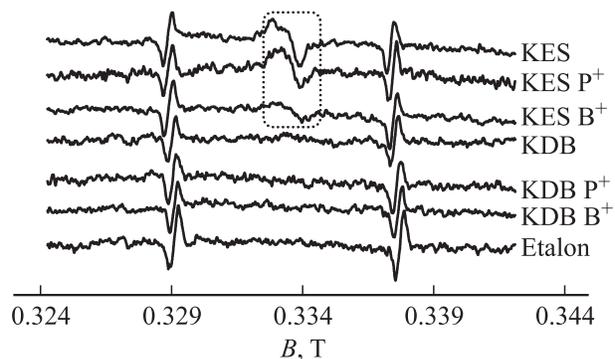


Рис. 4. Спектры ЭПР при 293 K тех же образцов ПК, что и на рис. 3. Пунктиром выделен спектр ЭПР P_b -центров.

кремнии КЭС 0.007. Сравнительно интенсивный спектр ЭПР P_b -центров ПК на КЭС 0.007, облученном ионами бора, показывает, что по крайней мере в этом варианте при анодном травлении кремния поры насквозь пронизали p - n -переход, расположенный на глубине около $2R_p \approx 800$ nm. В ЭПР проявляются P_b -центры, располагающиеся в наиболее углубленной части слоя ПК, где превалирует действие мелких доноров (сурьмы). Отсутствие спектра P_b -центров в ПК на КДБ 0.001, облученном ионами фосфора, объяснимо, во-первых, тем, что, как и в случае КЭС 0.007 с имплантацией фосфора, избыточное содержание мелкого донора не способствует усилению этого спектра ЭПР. Во-вторых, из-за меньшего в 4 раза пробега ионов фосфора толщина переходной области, где доноры и акцепторы сравнимы по концентрации, слишком мала. Наконец, отметим, что даже в случае КЭС 0.007 с имплантацией бора, когда отчетливо виден ЭПР P_b -центров, эти центры безызлучательной рекомбинации, видимо, не ухудшают люминесцентные свойства ПК, т.к. они пространственно отделены от подслоя с наиболее эффективным излучением света.

4. Заключение

Таким образом, с применением техники ФЛ и ЭПР продемонстрирована возможность увеличения на два порядка квантового выхода ФЛ при совместном легировании кремния мелкими донорами и акцепторами. В согласии с данными авторов [11], которые химически легировали ПК бором и фосфором, экспериментальные результаты настоящей работы свидетельствуют, что наблюдавшееся совместное существование мелких доноров и акцепторов обеспечивает оптимальное положение уровня Ферми в ПК и максимум интенсивности ФЛ вблизи красного участка спектра видимого света. По-видимому, дальнейшая оптимизация термообработок позволит значительно увеличить квантовый выход красной ФЛ. Поскольку нами получены структуры с переходом от донорного к акцепторному легированию в пределах слоя ПК, представляют интерес исследования транспорта носителей тока в таком неоднородном материале и выяснение возможности эффективной электролюминесценции при поперечном токе в диодных структурах с прослойкой ПК. Ионная имплантация фосфора в пористый слой после его формирования на сильно легированных мелкими примесями монокристаллах кремния как p^+ , так и n^+ -типа подавляет ФЛ ПК. Однако и этот вариант нуждается в дальнейших исследованиях влияния последующих термообработок на облученный ионами ПК. Важно, что приведенные выше результаты подтверждают возможность управления свойствами пористого кремния путем изменения содержания мелких в сплошном кремнии доноров или акцепторов.

Список литературы

- [1] W. Thieß. Surf. Sci. Rep. **29**, 3/4, 91 (2007).
- [2] A.G. Cullis, L.T. Canham, P.D.J. Calcott. Appl. Phys. **82**, 909 (1997).
- [3] O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi, Surf. Sci. Rep. **38**, 1/3, 1 (2000).
- [4] Е.С. Демидов, Н.Е. Демидова. Вестн. ННГУ. Сер. ФТТ **1**, 22 (2005).
- [5] Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, В.Г. Шенгуров. Письма в ЖЭТФ **67**, 794 (1998).
- [6] N. Koshida, H. Koyama. Nanotechnology **4**, 192 (1992).
- [7] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett. **57**, 1046 (1990).
- [8] B. Gelloz, N. Koshida. Thin Solid Films **508**, 406 (2006).
- [9] Е.С. Демидов, В.Г. Шенгуров, Н.Е. Демидова, В.Н. Шабапов. ФТП **28**, 701; 1503 (1994).
- [10] M. Fujii, Y. Yamaguchi, Y. Takase, K. Ninomiya, S. Hayash. Appl. Phys. Lett. **85**, 1158 (2004).
- [11] D.I. Tetelbaum, I.A. Karpovich, M.V. Stepihova, V.G. Shengurov, K.A. Markov, O.N. Gorshkov. Surf. Investigation **14**, 601 (1998).
- [12] Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, О.Н. Горшков, А.П. Касаткин, В.А. Бурдов, А.В. Ершов, А.И. Белов, Д.А. Камбаров, В.К. Васильев, А.И. Ковалев, Д.Л. Вайнштейн, Д.М. Гапонова, Р. Turan, S. Yerci, L. Pavesi, L. Ferraioli, T.G. Finstad, S. Foss. Нанотехника **3**, 36 (2006).
- [13] C. Peng, P.M. Fauchet, J.M. Rehm, G.L. McLendon, F. Selferth, S.K. Kurinec. Appl. Phys. Lett. **64**, 1259 (1994).
- [14] S. Sen, J. Siejka, A. Savtchouk, J. Ladowski. Appl. Phys. Lett. **70**, 2253 (1997).
- [15] C. Peng, P.M. Fauchet. Appl. Phys. Lett. **67**, 2515 (1995).
- [16] Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Н.Е. Демидова, И.С. Белорунова, О.Н. Горшков, М.В. Степихова, А.М. Шаронов. ФТТ **47**, 136 (2005).
- [17] Е.С. Демидов, В.В. Карзанов, Н.Е. Демидова, И.С. Расолова, О.Н. Горшков, М.О. Марычев, М.В. Степихова, А.М. Шаронов. ФТТ **49**, 508 (2007).