

06.1; 06.3; 07

© 1992

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРО- И ФОТОВОЗБУЖДЕНИИС.Н. Кузнецов, Л.Я. Березин,
Г.Б. Стефанович

Пористый кремний (ПК) как объект для создания изолирующих слоев в микроэлектроника изучается давно [1], но только в 1990 г. была обнаружена интенсивная фотолюминесценция (ФЛ) пористого кремния в видимой области спектра [2]. Позднее была зарегистрирована электролюминесценция (ЭЛ) в контакте с прозрачными проводящими электродами [3]. Указанные наблюдения явились неожиданными, так как в объемном кристаллическом Si прямые оптические переходы в центре зоны Бриллюэна являются запрещенными, а вероятность непрямых излучательных переходов очень мала. В практическом аспекте это лишало кремний перспектив материала для создания интегральных оптоэлектронных приборов. Таким образом, повышенная эффективность и коротковолновый сдвиг излучения пористого кремния позволили предположить иной механизм излучательного процесса. Базируясь на морфологических данных о ПК, получила распространение гипотеза о квантовом связывании носителей в кристаллических островках Si нанометровых размеров [3]. Однако необходимой предпосылкой для конкретизации является изучение влияния способа возбуждения люминесценции ПК на спектр свечения. Экспериментальные результаты по этому и сопутствующим вопросам излагаются ниже.

Для приготовления пористого кремния использовались монокристаллические подложки кремния с ориентацией (111) и концентрацией бора 10^{17} см^{-3} . Поверхность пластин перед выращиванием пористого слоя подвергалась стандартной обработке. Слои ПК получены в анодном электрохимическом процессе в гальваностатическом режиме при плотности тока до $100 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение нескольких минут. Основную часть электролита составляла фтористоводородная кислота. Нанесение прозрачного проводящего электрода площадью $\approx 0,1 \text{ см}^2$ осуществлялось или через маску пиролизом спиртового раствора SnCl_4 при температуре подложки 500°C методом пульверизации, или вакуумным резистивным напылением тонких металлических слоев золота или никеля на неподогреваемую подложку.

Спектры электролюминесценции исследовались на автоматизированном спектральном комплексе, реализующем оптимальное соотношение между разрешающей способностью и светосилой: разрешение $\approx 1 \text{ нм}$, относительное отверстие 1:2.5. Возбуждение элект-

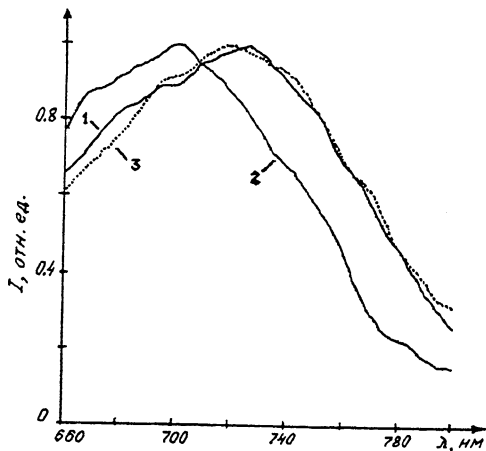


Рис. 1. Нормированные на максимум спектры люминесценции пористого кремния. 1 - при электровозбуждении, 2 - при фотовозбуждении (ультрафиолет), 3 - He-Ne лазер.

ролюминесценции осуществлялось в режиме заданного тока, если не оговорено иное, при плотности тока $1 \text{ A} \cdot \text{см}^{-2}$. Фотолюминесценция возбуждалась как расфокусированным пучком гелий-неонового лазера ($\lambda = 632.8 \text{ нм}$), так и водородным континуумом в интервале (200–250) нм. Регистрация сигнала люминесценции с выхода фотоэлектронного умножителя проводилась в режиме счета фотонов. Первичные данные корректировались на функцию спектральной чувствительности всего оптического тракта.

Изучение взаимосвязи между спектрами ЭЛ и ФЛ проводилось на параллельных сериях образцов пористого кремния, полученного в одном и том же цикле анодирования: на части подложек формировались прозрачные электроды, другая часть имела открытую поверхность. На образцах с открытой поверхностью измерялись спектры фотолюминесценции. На рис. 1 приведены фрагменты типичных спектров в окрестности своих максимумов, нормированные на величину интенсивности в максимуме. Видно, что форма спектров и их положение весьма близки при электро- и фотовозбуждении в длинноволновой части спектра. При возбуждении ФЛ ультрафиолетом положение контура излучения сдвинуто на $\Delta\lambda \approx 25 \text{ нм}$ в коротковолновую область.

Таким образом, представленные данные позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, природа излучательного процесса в пористом кремнии едина и слабо зависит от механизма поставки неравновесных носителей. Во-вторых, тесный контакт излучающих "центров" в пористом Si с твердофазным электродом (Ni, Au, SnO₂) не изменяет спектральных характеристик процесса. Наконец, сильное термическое воздействие, сопровождающее формирова-

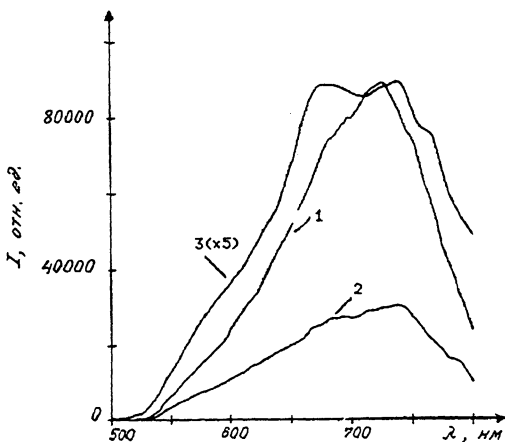


Рис. 2. Спектры электролюминесценции пористого кремния. 1 - в стационарном режиме (прямое смещение), 2 - обратное смещение), 3 - при импульсном обратном смещении.

ние окисного электрода SnO_2 , не влияет на состав излучения ПК. Такое влияние можно было бы ожидать из-за термодесорбции дигидридных кремниевых групп ($Si-H_2$) из пористого Si , если в роли люминесцирующего агента рассматривать полиатомные кремний-водородные образования [3].

Приведенные выше факты не противоречат, по крайней мере, вышеупомянутой гипотезе о люминесценции пористого Si как проявлении квантового связывания носителей в локальных областях кристаллического „скелета“. Коротковолновый сдвиг ФЛ при ультрафиолетовом возбуждении можно объяснить наличием градиента пористости пленки по толщине - характеристический линейный размер кремниевых кристаллитов на внешней поверхности меньше [1]. При УФ возбуждении с относительно малой глубиной проникновения света в пористый слой переизлучают кристаллиты с большей энергией связывания, и спектр смещается в коротковолновую область. Возможно и другое объяснение наблюдавшегося сдвига (см. ниже).

Исследованные структуры с нанесенным электродом имели ярко выраженную нелинейную вольт-амперную характеристику в диапазоне плотностей тока $(10^{-2}-1) A \cdot cm^{-2}$. При изменении тока в указанных пределах напряжение на структуре возрастало с током менее чем в 3 раза. Однако, в отличие от $p-n$ перехода или перехода Шоттки, выпрямление практически отсутствовало.

Обнаружено, что интенсивность излучения определялась величиной возбуждающего тока. В пределах $(10^{-2}-10^{-1}) A \cdot cm^{-2}$ наблюдалась близкая к линейной люкс-амперная характеристика; вне этого интервала с ростом тока подъем интенсивности монотонно замедлялся. Вероятной причиной отклонения от линейности может быть

эффект термического тушения, так как измерения проводились в отсутствие термостатирования образца.

На рис. 2 (кривые 1 и 2) приведены спектры ЭЛ структуры для одинаковой плотности тока при смещении образца в прямом и обратном направлениях (под прямым смещением понимается полярность напряжения, обеспечивающая обогащение поверхности Si основными носителями). Различия формы спектров ЭЛ (в стационарном режиме) в зависимости от направления тянущего поля были незначительными. Интереснее причина сильного влияния полярности на интенсивность ЭЛ при практическом отсутствии выпрямления в структуре. Можно предположить, что это связано со значительной безызлучательной компонентой полного тока, зависящей от полярности смещения: при обедняющем изгибе зон на поверхности Si эта компонента больше.

Эффект уширения спектра ЭЛ при обратном смещении, наблюдавшийся в стационарных условиях протекания тока, проявился более отчетливо при импульсном обратном смещении – рис. 2, кривая 3. Смещение структуры осуществлялось импульсами линейно нарастающего (со скоростью $\approx 10^7 \text{ В} \cdot \text{с}^{-1}$) напряжения. Прямое осциллографическое измерение напряжения на структуре показало, что его амплитуда превышает 10 В – напряжение лавинного пробоя резкого несимметричного $p-n$ перехода при концентрации $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в $p-Si$. Следует отметить, что указанное обстоятельство не позволяет сделать вывод о реализации однородного лавинного пробоя в области пространственного заряда кремния. Однако неоднородность границы кремниевая подложка – ПК может способствовать развитию локальных лавинных пробоев. Известно, что лавинное умножение сопровождается разогревом носителей. Поэтому возможно уширение спектра ЭЛ за счет эффекта нетермализованных носителей. При импульсном возбуждении ЭЛ в прямом направлении эффект уширения люминесцентной полосы отсутствовал. Переход от стационарного режима питания возбуждения к импульсному с длительностью до $\approx 10^{-6}$ с не влиял также на интенсивность ЭЛ. Лишь при дальнейшем уменьшении до 10^{-7} с отмечено небольшое понижение интенсивности излучения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б о н д а р е н к о В.П., Б о р и с е н к о В.Е., Г л и н е н к о Л.Н., Р а й к о В.А. // Зарубежная электронная техника. 1989. № 9. С. 55–84.
- [2] С a n h a m L.T. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046–1048.
- [3] Abstracts Symposium AA, Material Research Society 1991 Fall Meeting. Boston, December 1991.

Петрозаводский
государственный университет

Поступило в Редакцию
3 ноября 1992 г.