

КОРОТКОЖИВУЩАЯ ЗЕЛЕНАЯ ПОЛОСА И ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.В.Андреианов, Д.И.Ковалез, В.Б.Шуман, И.Д.Ярошецкий

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

194021, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 9 июня 1992 г.

После переработки 30 июля 1992 г.

При исследовании временной эволюции спектра излучения пористого кремния обнаружена короткоживущая полоса излучения. Исследована трансформация спектра в широком временном интервале ($10^{-8} - 10^{-5}$)с.

Обнаружение эффективного излучения в непрямозонном полупроводнике ¹ породило проблему пористого кремния, интерес к которой лавинообразно возрастает ². До настоящего времени считалось, что излучение пористого кремния представляет широкую безструктурную полосу в области 1,7 – 1,9эВ. В настоящей работе обнаружена спектрально-временная трансформация излучения пористого кремния и показано наличие, при определенных условиях, двух полос излучения. Слои пористого кремния выращивались в 20%-ном водном растворе HF при протекании анодного тока плотностью $j = 50 - 60$ мА/см² в течение 3–5 мин. В качестве подложек использовались полированные пластины p-Si с удельным сопротивлением 1 Ом/см и ориентацией [100].

Спектр комбинационного рассеяния, измеренный при $T = 300$ К, содержит одиночную узкую линию, смещенную на 2^{-1} см в низкочастотную область по отношению к линии LO-фонона объемного кремния, что свидетельствует об отсутствии заметной аморфизации в исследованных образцах.

Возбуждение осуществлялось азотным импульсным лазером $\lambda = 3370$ Å, $t_i = 10$ нс, а также непрерывным аргоновым лазером $\lambda = 4880$ Å. Уровень возбуждения составлял 10–100 Вт/см² при стационарном возбуждении и $10^4 - 10^5$ Вт/см² в случае импульсного возбуждения. Для регистрации сигналов в непрерывном режиме использовалась схема счета фотонов, импульсные измерения проводились с помощью стробоскопической системы регистрации (ширина стробимпульса 4 нс) с временным разрешением ~ 20 нс.

На вставке к рис.1 приведен спектр фотолюминесценции (ФЛ) при $T = 300$ К, полученный в условиях возбуждения непрерывным аргоновым лазером. Наблюдается широкая безструктурная полоса с максимумом в области 1,75эВ. Время-разрешенные спектры (рис.1) кардинально отличаются от спектра, приведенного на вставке к рис.1. Видно, что для момента регистрации, совпадающего с максимумом лазерного импульса ($\Delta t = 10$ нс) максимум ФЛ приходится на зеленую область. Энергия максимума полосы ФЛ приходится на 2,36эВ. При сдвиге момента регистрации относительно максимума лазерного импульса на 15 нс ($\Delta t = 25$ нс) отчетливо наблюдаются две полосы ФЛ: коротковолновая (A1) с максимумом при 2,5эВ и длинноволновая (A2) с максимумом при 2,08эВ. Дальнейшее увеличение задержки момента регистрации относительно лазерного импульса приводит к тому, что положение полосы A1 практически не меняется, а полоса A2 все время смещается в

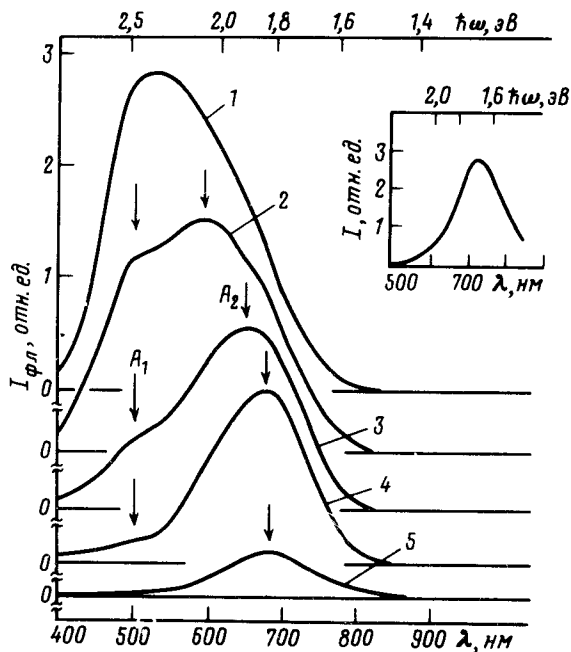


Рис.1. Время-разрешенные спектры фотолюминесценции пористого кремния при различных временах задержки момента регистрации относительно начала лазерного импульса (Δt), $T = 300$ К: 1— $\Delta t = 10$ нс; 2— $\Delta t = 25$ нс; 3— $\Delta t = 50$ нс; 4— $\Delta t = 75$ нс; 5— $\Delta t = 1$ мкс. На вставке: спектр фотолюминесценции пористого кремния при стационарном возбуждении аргоновым лазером ($\lambda = 488$ Å)

длинноволновую сторону спектра. Причем, как видно из рис.1, полоса A2 становится доминирующей, а при задержках $\Delta t > 100$ нс полоса A1 в спектрах практически не наблюдается. Полосы A1 и A2 имеют полуширину ($\sim 0,4$ эВ) и вследствие этого перекрываются. На рис.2а приведены временные развертки формы импульса фотолюминесценции на различных длинах волн. Во всех случаях форма импульса ФЛ отражает комбинацию двух сигналов: быстрого, практически полностью повторяющего лазерный импульс, из полосы A1 и медленного с временем спада в микросекундном диапазоне из полосы A2. В зависимости от выбранной длины волны соотношение интенсивности быстрой и медленной компоненты ФЛ, как видно из рис.2а меняется.

При $T = 4,2$ К ситуация существенно изменяется. Амплитуда медленной составляющей сигнала ФЛ существенно уменьшается. Медленная ($\Delta 100$ нс), слабая компонента появляется при длинах волн ~ 6000 Å. Во время-разрешенных спектрах наблюдается только одна безструктурная полоса, максимум которой при увеличении задержки несколько смещается в длинноволновую область спектра. Спектр ФЛ, снятый при стационарном возбуждении приведен на вставке к рис.3. В целом, данный спектр незначительно отличается от спектра при $T = 300$ К (вставка к рис.1).

Таким образом, спектры ФЛ, снятые с временным разрешением при $T = 300$ К свидетельствуют о наличии двух характерных полос излучения A1 и A2, отличающихся по энергии излучения и времени затухания люминесценции. Причем, длинноволновая полоса с временем спада в микросекундном диапазоне определяет, в основном, спектр ФЛ, наблюдающийся в условиях стационарного фотовозбуждения (см. рис.1).

На наш взгляд, наблюдающуюся спектрально-временную трансформацию

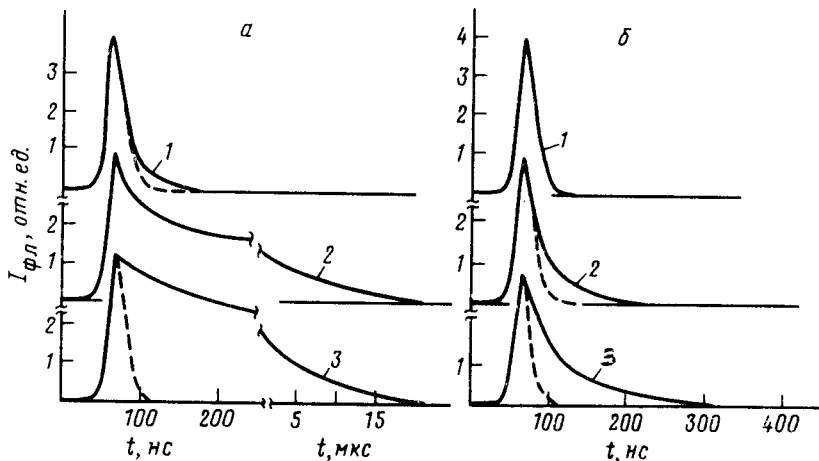


Рис.2. Кинетики фотолуминесценции пористого кремния на различных длинах волн: а - $T = 300$ К: 1 - $\lambda = 5000$ Å; 2 - $\lambda = 6000$ Å; 3 - $\lambda = 6500$ Å. б - $T = 4,2$ К: 1 - $\lambda = 5000$ Å; 2 - $\lambda = 6000$ Å; 3 - $\lambda = 6500$ Å. Пунктирная линия - форма лазерного импульса возбуждения

ФЛ можно объяснить в соответствии с существующими представлениями о пористом кремнии, как системе размерно-квантованных проволок. В соответствии с этими представлениями спектр ФЛ формируется за счет излучательной рекомбинации носителей, локализованных в потенциальных ямах различной ширины. Смещение спектров ФЛ при $T = 4,2$ К с увеличением задержки в красную область (рис.3) свидетельствует о том, что механизм безызлучательной рекомбинации, обуславливающий короткую кинетику (рис.2б), более эффективен для узких квантовых проволок и, соответственно, больших энергетических зазоров, ответственных за люминесценцию в зеленой области спектра. Эта рекомбинация, например, может быть вызвана поверхностными состояниями, которые обеспечивают более быструю кинетику ФЛ из узких ям (в коротковолновой области спектра) ввиду большего отношения площади поверхности квантовой проволоки к ее объему. В этом случае следует ожидать смещения времяз разрешенных спектров по мере увеличения времени задержки в красную область спектра (рис.3). Наряду с этим, в спектрах ФЛ может также проявиться процесс миграции возбуждения. Так, при $T = 300$ К диффузионная длина носителей, контролируемая коротким ~ 10 нс безызлучательным временем жизни составляет величину ~ 1 мкм, что может явиться причиной ухода носителей из области с эффективным каналом безызлучательной рекомбинации. Это, в свою очередь, должно привести к появлению в кинетике ФЛ медленной составляющей, которая будет более ярко выражена в красной области спектра (для потенциальных ям большой ширины). Как следствие, в спектрах люминесценции следует ожидать появления двух пиков: первой, смещенной в коротковолновую область спектра, обусловленной быстрой составляющей кинетики и второй, в длинноволновой области спектра,

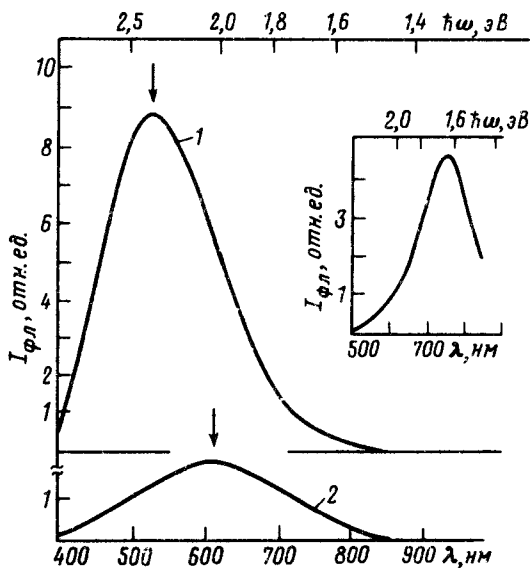


Рис.3. Время-разрешенные спектры фотолюминесценции пористого кремния при различных временах задержки момента регистрации относительно начала лазерного импульса (Δt), $T = 4,2\text{ K}$: 1— $\Delta t = 10\text{ нс}$; 2— $\Delta t = 50\text{ нс}$. На вставке: спектр фотолюминесценции пористого кремния при стационарном возбуждении аргоновым лазером ($\lambda = 4880\text{ \AA}$)

имеющей медленную кинетику. Необходимо отметить, что медленная составляющая кинетики ФЛ в условиях импульсного возбуждения появляется при $T \sim 120\text{ K}$.

В такой ситуации, как при $T = 4,2\text{ K}$, так и при $T = 300\text{ K}$ спектры люминесценции, полученные при стационарном возбуждении будут, в основном, формироваться за счет излучения широких потенциальных ям, в которых канал безызлучательной рекомбинации менее эффективен. Это, по-видимому, и является причиной отсутствия их существенного отличия (рис.1,3).

Авторы выражают благодарность М.С.Бреслеру, Е.Л.Ивченко и И.Н.Яснеевич за обсуждение результатов работы.

1. L.T.Canham, Appl. Phys. Lett. 57, 1046 (1990).

2. Abstracts of AA Symposium of MKS Fall Meeting, 1991, Boston.