

АНОМАЛЬНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.В.Андреанов, Д.И.Ковалев, Н.Н.Зиновьев, И.Д.Ярошецкий

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

194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 5 мая 1993 г.

После переработки 20 июля 1993 г.

Обнаружена линейная поляризация фотолюминесценции пористого кремния в условиях высокоэнергетичного нерезонансного возбуждения линейно поляризованным светом. Установлено, что время деполяризации этого излучения при температурах вплоть до $T = 300\text{ К}$ аномально велико ($\sim 10\text{ мкс}$).

Открытие эффективной видимой фотолюминесценции (ФЛ) пористого кремния (ПК) [1] послужило толчком к интенсивным исследованиям этого материала и механизма формирования его ФЛ. В [2] была обнаружена линейная поляризация (ЛП) ФЛ в пористом кремнии при низких температурах в условиях его возбуждения в полосу ФЛ светом аргонового лазера. В работе [3] сообщалось о наблюдении во время-разрешенных спектрах ФЛ пористого кремния двух полос излучения: коротковолновой полосы $A1$, имеющей наносекундное время жизни, и длинноволновой полосы $A2$, обладающей временем жизни 10 мкс и определяющей спектр люминесценции в условиях стационарного фотовозбуждения.

В настоящей работе сообщается об обнаружении линейной поляризации ФЛ пористого кремния при высокоэнергетичном нерезонансном возбуждении линейно поляризованным светом в условиях значительных энергетических потерь $\sim 1 - 2\text{ эВ}$. На основании исследования временных и спектральных характеристик ФЛ выделен вклад различных излучательных каналов в формировании время-разрешенных и стационарных спектральных зависимостей степени ЛП ρ излучения пористого кремния. Исследовались слои пористого кремния с ориентацией (100), процедура изготовления которого описана в [3]. Люминесценция возбуждалась линейно поляризованным пучком импульсного N_2 -лазера ($t_{\text{и}} = 10\text{ нс}$, $\lambda = 3370\text{ \AA}$, $P = 10^2 - 10^3\text{ Вт/см}^2$), а также стационарным излучением Ar^+ ($\lambda = 4880\text{ \AA}$) или He-Ne ($\lambda = 6328\text{ \AA}$) лазеров с $P \sim 1\text{ Вт/см}^2$. Возбуждающий свет падал нормально к поверхности кристалла, ФЛ наблюдалась под малым углом к направлению распространения возбуждающего света. Для измерения ФЛ использовались двойной монохроматор ДФС-24, импульсная регистрация с разрешением $\sim 20\text{ нс}$ и схема счета фотонов.

Время-разрешенные спектры ФЛ, приведенные на рис.1а, содержат две полосы $A1$ и $A2$ [3]. Фотолюминесценция линейно поляризована во всем диапазоне длин волн и $\rho = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp})$ [4] достигает 0,3 на голубом краю полосы $A1$ (рис.1.б). Здесь I_{\parallel} — интенсивность ФЛ, поляризованной так же, как возбуждающий свет, I_{\perp} — интенсивность ФЛ, поляризованной в перпендикулярном направлении. В случае задержки момента регистрации ФЛ относительно максимума лазерного импульса 1 мкс , когда время-разрешенный спектр формируется только полосой $A2$, ρ составляет для этой полосы 0,06 — 0,1. При временах задержки $10 - 100\text{ нс}$, когда время-разрешенные спектры

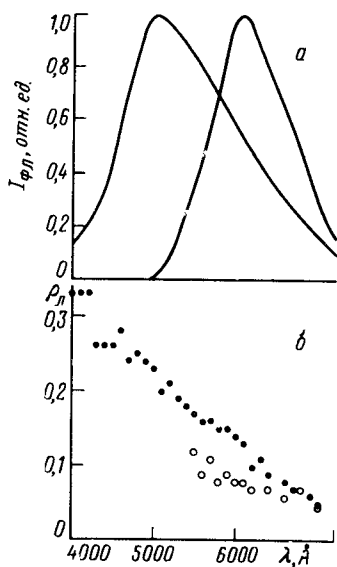


Рис.1. *a* – Время-разрешенные спектры ФЛ пористого кремния при различных временах задержки момента регистрации относительно начала лазерного импульса (Δt), $T = 300\text{ K}$: кривая 1 – $\Delta t = 10\text{ нс}$, 2 – $\Delta t = 1\text{ мкс}$. *b* – Спектральные зависимости ρ время-разрешенных спектров: \bullet – $\Delta t = 10\text{ нс}$, \circ – $\Delta t = 1\text{ мкс}$

формируются как суперпозиция полос $A1$ и $A2$, спектральная зависимость ρ отражает вклад обеих полос. Степень линейной поляризации не зависит от ориентации вектора поляризации накачки в плоскости исследованных образцов и совпадает с ним по направлению. Обнаружено, что время релаксации ρ излучения в максимуме полосы $A2$ (рис.2) составляет несколько микросекунд ($\sim 10\text{ мкс}$), что порядка времени жизни люминесценции. На рис.3 приведен спектральный ход ρ ФЛ при различных энергиях квантов возбуждающего света. Можно видеть, что уменьшение разности в энергиях кванта возбуждения и ФЛ приводит к росту степени поляризации ФЛ. Наблюдается также уменьшение степени поляризации на длинноволновом крыле полосы ФЛ. Установлено, что магнитное поле вплоть до 36 кЭ в геометрии Фарадея практически не влияет на ρ ФЛ.

Сохранение линейной поляризации возбуждающего света в излучении полупроводников известно, например, для горячей ФЛ прямозонных полупроводников [4] и объясняется выстраиванием импульсов фотовозбужденных носителей заряда линейно поляризованным светом. Однако выстраивание наблюдается только вблизи линии излучения накачки и исчезает после испускания неравновесными носителями нескольких фононов. Время изотропизации неравновесной функции распределения, а значит и время релаксации линейной поляризации ФЛ, составляет в этих условиях величину $10^{-13} - 10^{-11}\text{ с}$. Время затухания линейной поляризации ФЛ, наблюдаемое нами, составляет существенно большую величину, что говорит о совершенно ином механизме линейной поляризации ФЛ в пористом кремнии. Об этом свидетельствует и спектральная зависимость ρ . Поляризация сохраняется при разнице $\hbar\omega_{\text{возб}}$ и $\hbar\omega_{\text{ФЛ}}$ в $1-2\text{ эВ}$ (см. рис.1,3), что соответствует энергии $20-40$ оптических фононов. Спад ρ по мере роста $\hbar\omega_{\text{возб}}$, а также с увеличением разницы между $\hbar\omega_{\text{возб}}$ и $\hbar\omega_{\text{ФЛ}}$ (см. рис.3) свидетельствует о том, что энергетическая релаксация сравнительно слабо влияет на степень линейной поляризации.

По нашему мнению, наблюдаемую поляризацию ФЛ можно понять, если считать, что исследуемая система представляет набор хаотически распределенных одномерных нанокристаллов, обуславливающих эффективную видимую

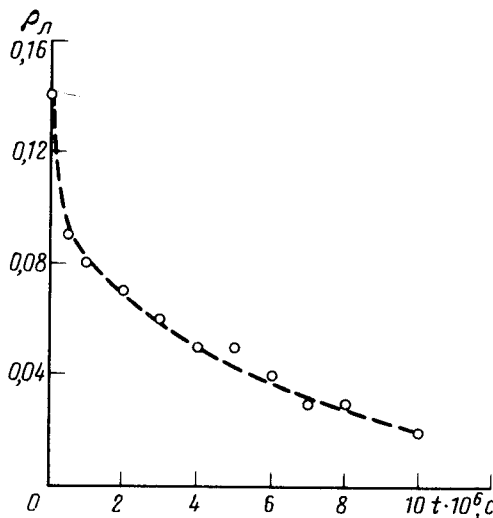


Рис.2

Рис.2. Кинетика $\rho_{\text{л}}$ ФЛ пористого кремния при импульсном лазерном возбуждении, $T = 300 \text{ K}$, λ регистрации = 6500 Å

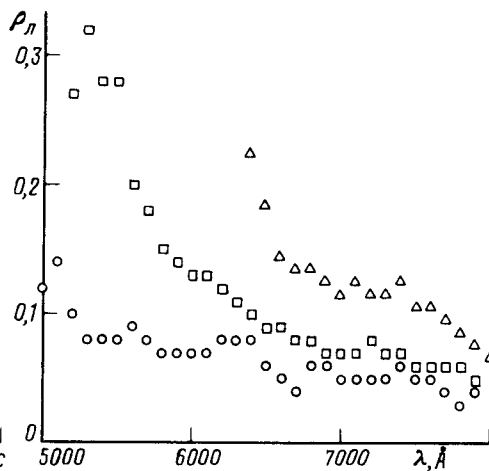


Рис.3

Рис.3. Спектральные зависимости $\rho_{\text{л}}$ ФЛ пористого кремния при различных длинах волн возбуждающего излучения: $T = 300 \text{ K}$: $\circ - \lambda = 3370 \text{ Å}$ (квазистационарный спектр); $\square - \lambda = 4880 \text{ Å}$; $\Delta - \lambda = 6328 \text{ Å}$

ФЛ пористого кремния.

Анизотропным должно быть поглощение линейно поляризованного света в каждом отдельно взятом нанокристалле в силу его несферичности. В случае квазиодномерного нанокристалла, у которого больший размер параллелен вектору поляризации возбуждающего света, поглощение будет существенно выше, чем поглощение у нанокристалла, расположенного, например, перпендикулярно вектору поляризации возбуждения. Можно показать, что вследствие квазиодномерности должна быть анизотропна в смысле поляризации и термализованная люминесценция, которая будет преимущественно поляризована вдоль направления большего размера нанокристалла. Параметром указанной анизотропии должно быть отношение длины нанокристалла L к его ширине D , то есть $\sim L/D$. Хаотическое распределение нанокристаллов приводит к тому, что число преимущественно возбуждаемых квазиодномерных нанокристаллов будет практически одинаковым при любом направлении вектора E возбуждающего свет. Излучение из всей совокупности возбужденных нанокристаллов будет линейно поляризованным вдоль вектора поляризации накачки, и вектор поляризации ФЛ будет отслеживать направление вектора поляризации возбуждающего света при его поворотах.

Если отсутствует миграция энергии между нанокристаллами, то ФЛ будет линейно поляризованной, пока она существует. Процесс же миграции энергии будет приводить к деполаризации ФЛ. Легко понять в такой модели отсутствие влияния магнитного поля на степень линейной поляризации ФЛ.

В заключение авторы выражают благодарность М.И.Дьяконову и В.И.Перелю за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-3669).

-
1. T.L.Canham, Appl. Phys. Lett. **57**, 1046 (1990).
 2. А.Н.Старухин, А.А.Лебедев, Б.С.Разбирин, Л.М.Капитонова. Письма в ЖТФ **18**, 60 (1992).
 3. А.В.Андреанов, Д.И.Ковалев, В.Б.Шуман, И.Д.Ярошецкий, Письма в ЖЭТФ **56**, 242 (1992).
 4. Б.П.Захарченя, Д.Н.Мирлин, В.И.Перель, И.И.Решина, УФН **136**, 459 (1982).