

©1994 г.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ КРАЕВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ SiC-6H

*Я.В.Морозенко*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 22 декабря 1993 г. Принята к печати 27 декабря 1993 г.)

Исследовано пространственное распределение интенсивности экситонной и донорно-акцепторной фотолюминесценции эпитаксиальных слоев SiC-6H. Квантовый выход люминесценции этих слоев хаотически изменяется по площади эпитаксиального слоя с характерным масштабом флуктуаций 3–5 мм. Установлено, что среднее относительное отклонение амплитуды слоев люминесценции зависит от концентрации легирующих примесей и степени компенсации проводимости, а также от температуры образца.

Температурные и концентрационные зависимости макроскопических пространственных флуктуаций экситонной люминесценции свидетельствуют о локализации экситонов мелкомасштабными флуктуациями потенциального рельефа зон в компенсированных образцах и в образцах *p*-типа карбида кремния.

Экситонная люминесценция в SiC-6H не тушится при высокой температуре вплоть до 950 К [1]. Это позволило создать высокотемпературный синий светодиод, работоспособный при 500 °С [2]. Однако в результате несовершенства технологии квантовый выход экситонной люминесценции в эпитаксиальных SiC-6H структурах сильно изменяется по площади *p*–*n*-перехода, что является существенным недостатком при промышленном производстве светодиодов с экситонной полосою люминесценции. В работе исследовались пространственные флуктуации интенсивности экситонной и донорно-акцепторной *D*–*A* люминесценции эпитаксиальных слоев SiC-6H в образцах с различной концентрацией легирующих примесей и разной степенью компенсации.

Эпитаксиальные слои (ЭС) были выращены методом бесконтейнерной жидкостной эпитаксии [3] В.А.Дмитриевым и А.В.Черенковым. Слои выращивались на Si-границе ориентированных (плоскость подложки перпендикулярна оси *C*) и разориентированных SiC-6H-подложек (нормаль к плоскости подложки наклонена в направлении [11 $\bar{2}$ 0] на угол 1° по отношению к оси *C* с целью улучшения качества эпитаксиального слоя); слои легировались азотом (донор) и алюминием (ак-

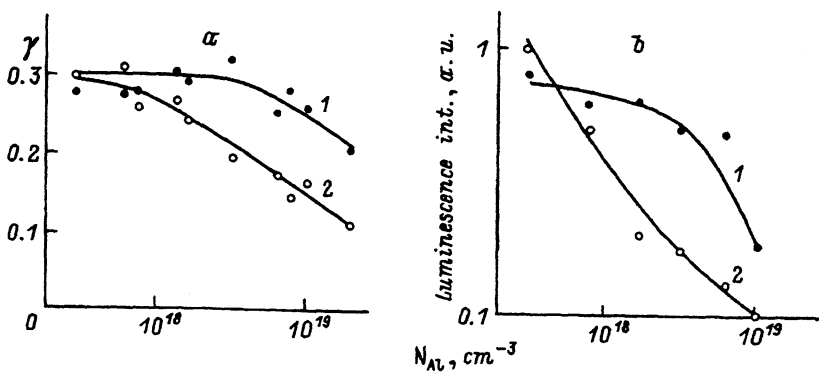


Рис. 1. Зависимость характеристик экситонной люминесценции от концентрации алюминия  $N_{Al}$  в эпитаксиальном SiC-6H слое при различных температурах: *a* — зависимость среднего относительного отклонения амплитуды экситонной люминесценции  $\gamma$  от  $N_{Al}$ ; *b* — зависимость интенсивности экситонной люминесценции от  $N_{Al}$ .  $T$ , К: — 1 — 510, 2 — 200.

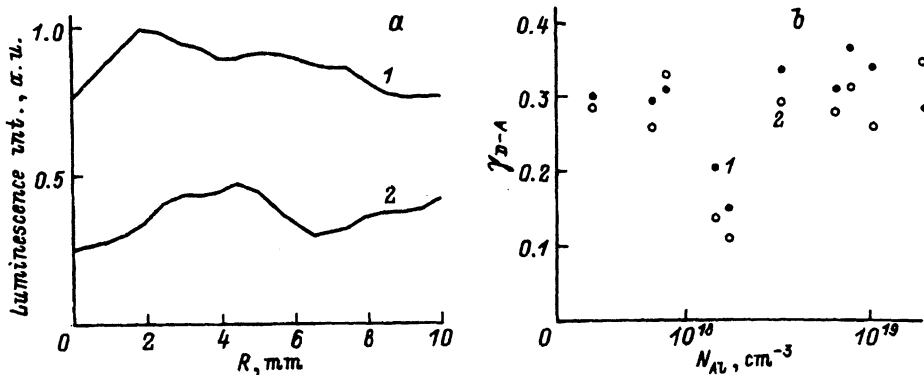
цептор). Исследовались слои с различным содержанием азота и алюминия, а также с разной степенью компенсации; концентрация азота менялась от  $0.5 \cdot 10^{18}$  до  $1.5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ , алюминия — от фоновой до  $2 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ . При малых концентрациях алюминия слои росли *n*-типа, при более высоких — *p*-типа за счет перекомпенсации.

Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась импульсным азотным лазером с энергией квантов 3.68 эВ; при исследовании пространственных флуктуаций интенсивности люминесценции световой пучок фокусировался на кристалле в пятно диаметром 50 мкм. Для исключения вклада ФЛ подложки отбирались подложки со слабой люминесценцией, а слои выращивались достаточно толстыми (10–15 мкм).

Спектры люминесценции ЭС состоят в основном из полос люминесценции экситона и *D*-*A*-рекомбинации. Подробно спектры образцов, исследованных в данной работе, описаны в [1]. Исследование показало, что квантовый выход экситонной ФЛ хаотически меняется по площади ЭС с характерным масштабом флуктуаций 3–5 мм. При высокой температуре ( $\lesssim 500$  К) среднее относительное отклонение амплитуды экситонной люминесценции  $\gamma$  равно 0.3 и практически не зависит от концентрации легирующих доноров и акцепторов (рис. 1, *a*). Лишь при концентрации алюминия  $> 10^{19}$  см $^{-3}$   $\gamma$  уменьшается до 0.2. В то же время при низкой температуре (100–300 К)  $\gamma$  сильно зависит от концентрации легирующих примесей и уменьшается в 3 раза при увеличении концентрации алюминия от фоновой до  $2 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ .

Наряду с изменением  $\gamma$  легирование ЭС примесями N и Al приводит к концентрационному тушению экситонной люминесценции при низкой температуре, причем зависимость интенсивности люминесценции от концентрации разная при разных температурах; в общих чертах она аналогична зависимости  $\gamma$  от концентрации Al (рис. 1, *b*).

Наблюдаемые зависимости характеристик экситонной люминесценции от температуры и концентрации легирующих примесей обусловлены, на наш взгляд, различием свойств экситонов в слоях SiC с разным типом проводимости. В [1] показано, что в слоях *n*-типа экситонная люминесценция при  $T \gtrsim 300$  К обусловлена аннигиляцией



**Рис. 2.** Характеристики люминесценции эпитаксиального SiC-6H слоя: а — зависимость полос донорно-акцепторной (1) и экситонной (2) люминесценции от координаты эпитаксиального слоя  $R$ ; б — зависимость среднего относительного отклонения амплитуды донорно-акцепторной люминесценции  $\gamma_{D-A}$  от концентрации алюминия  $N_{Al}$  в эпитаксиальном SiC-6H слое.  $T, K$ : 1 — 510, 2 — 200.

свободных экситонов; флуктуации интенсивности экситонной люминесценции в этом случае вызваны неравномерным распределением в слое центров безызлучательной рекомбинации. В компенсированных слоях и слоях  $p$ -типа экситоны захвачены потенциальным рельефом зон, созданным мелкомасштабными ( $\sim 20 \text{ \AA}$ ) непуассоновскими флуктуациями концентрации легирующих примесей. Локализация экситонов рельефом вблизи акцепторов Al приводит к возникновению нового канала безызлучательного распада — разрушению экситонов ионизованными акцепторами [1]. При низкой температуре этот механизм распада экситонов определяет интенсивность экситонной люминесценции в компенсированных слоях  $p$ -типа.

Таким образом, мелкомасштабные флуктуации примесной концентрации играют двойную роль: они локализуют экситон и одновременно способствуют его безызлучательному распаду. Это приводит к уменьшению интенсивности экситонной люминесценции и уменьшению амплитуды флуктуаций интенсивности вследствие изменения механизма безызлучательной гибели экситонов. При повышении температуры экситоны делокализуются и интенсивность люминесценции, а также амплитуда пространственных флуктуаций возрастают.

Интенсивность  $D-A$ -люминесценции также флуктуирует по площади ЭС с масштабом флуктуаций 2–5 мм. Однако закономерности, описывающие эти флуктуации, другие, чем у экситонной люминесценции. Во-первых, распределение интенсивности  $D-A$ -люминесценции по площади ЭС не повторяет распределения экситонной люминесценции (рис. 2, а). Во-вторых, амплитуда флуктуаций  $D-A$ -люминесценции  $\gamma_{D-A}$  практически не зависит от концентрации легирующих примесей ( $\gamma_{D-A} = 0.3$ ) как в слоях  $n$ -, так и  $p$ -типа во всем интервале исследованных температур. Компенсация проводимости приводит к значительному увеличению квантового выхода  $D-A$ -люминесценции (при  $T = 300 \text{ K}$  в 10 раз), а амплитуда флуктуаций уменьшается в 2–3 раза (рис. 2, б).

В работе [1] показано, что компенсация проводимости в SiC-6H приводит к характерным для компенсированных полупроводников изме-

нениям в спектре  $D-A$ -люминесценции, которые обусловлены потенциальным рельефом зон. При этом величина энергетического сдвига спектра в длинноволновую область соответствует пуассоновскому распределению примесей.

Таким образом, локализация носителей потенциальным рельефом зон (в случае  $D-A$ -люминесценции), так же как и локализация экситонов мелкомасштабными непуассоновскими флуктуациями, приводит к уменьшению макроскопической пространственной неоднородности люминесценции (с характерным масштабом флуктуаций 3–5 мм). Однако причина уменьшения  $\gamma_{D-A}$ , по-видимому, иная. На наш взгляд, уменьшение флуктуаций интенсивности  $D-A$ -люминесценции при компенсации обусловлено уменьшением вероятности захвата неравновесных носителей центрами безызлучательной рекомбинации.

Исследованные температурные и концентрационные зависимости пространственных флуктуаций экситонной люминесценции в SiC являются еще одним доказательством локализации экситонов потенциальным рельефом зон в компенсированных образцах и образцах  $p$ -типа карбида кремния.

Автор благодарит В.А.Дмитриева за предоставленные эпитаксиальные структуры SiC-6H. Мы признательны В.Е.Челнокову за внимание к работе. Данная работа выполнена при частичной поддержке Министерства обороны США.

#### Список литературы

- [1] В.В. Евстропов, И.Ю. Линьков, Я.В. Морозенко, Ф.Г. Пикус. ФТП, **26**, 969 (1992).
- [2] В.А. Дмитриев, И.Ю. Линьков, Я.В. Морозенко, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **18**, 19 (1992).
- [3] В.А. Дмитриев, П.А. Иванов, Я.В. Морозенко, И.В. Попов, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **12**, 240 (1985).

Редактор В.В. Чалдышев

---