

## НАБЛЮДЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ SiC-6H

Линьков И. Ю., Морозенко Я. В.

В спектре люминесценции монокристаллического SiC-6H обнаружены интенсивные линии излучения с энергией, большей энергии запрещенной зоны.

Краевая люминесценция карбида кремния исследована достаточно подробно. Для политипа 6H спектр краевой люминесценции расположен в фиолетовой и синей областях и при низкой температуре обусловлен в основном аннигиляцией свободного и связанного экситонов, а также донорно-акцепторной рекомбинацией [1].

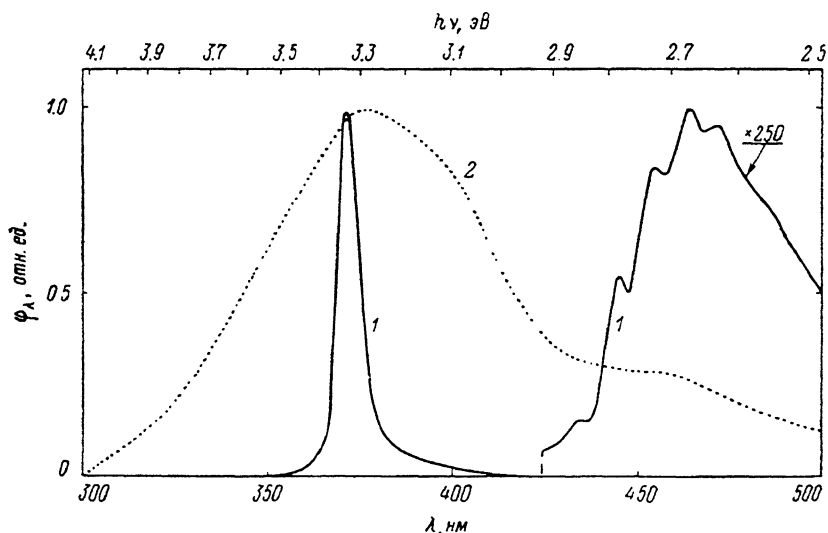


Рис. 1. Спектры люминесценции SiC-6H и  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  при  $T=83$  К.

1 — эпитаксиальный SiC-6H слой, выращенный БЖЭ. Концентрация примесей N и Al  $\sim 1 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ . 2 — эпитаксиальный  $(\text{SiC})_{1-x}(\text{AlN})_x$  слой.  $\phi_\lambda$  — спектральная плотность потока фотонов на единичный интервал длин волн. Спектры приведены к равному максимуму.

В работе исследованы спектры фото- и катодолуминесценции монокристаллического карбида кремния политипа 6H.

Исследовались образцы SiC-6H, выращенные тремя различными технологическими методами: объемные монокристаллы SiC-6H, выращенные по методу Мелли на Подольском химико-металлургическом заводе (температура роста — 2500—2700 °C); эпитаксиальные SiC-6H слои, выращенные сублимацией из паровой фазы (температура эпитаксии 1800—1900 °C) и эпитаксиальные SiC-6H слои, выращенные бесконтейнерной жидкостной эпитаксией (БЖЭ) из раствора-расплава Si—C [2] (температура эпитаксии 1450—1600 °C).

Спектры фотолуминесценции возбуждались линией 337 нм импульсного азотного лазера (энергия фотонов  $h\nu=3.68$  эВ) и линиями 303—313 нм ртутной

лампы ( $h\nu \approx 4$  эВ); катодолюминесценция возбуждалась электронами с энергией 15 кэВ. Максимальная плотность возбуждения на поверхности образца выбиралась такой, чтобы избежать заметного нагрева кристалла.

Исследование люминесценции проводилось в геометрии «на отражение» как на образцах с поверхностью, полученной в процессе роста, так и на образцах, поверхность которых травилась с целью очистки (монокристаллы SiC подвергались химическому травлению в расплаве KOH на глубину до 50 мкм; эпитаксиальные слои травились реактивным ионно-плазменным методом [3] на глубину около 2 мкм).

В спектрах фото- и катодолюминесценции всех исследованных образцов наряду с полосами обычной краевой люминесценции обнаружены линии

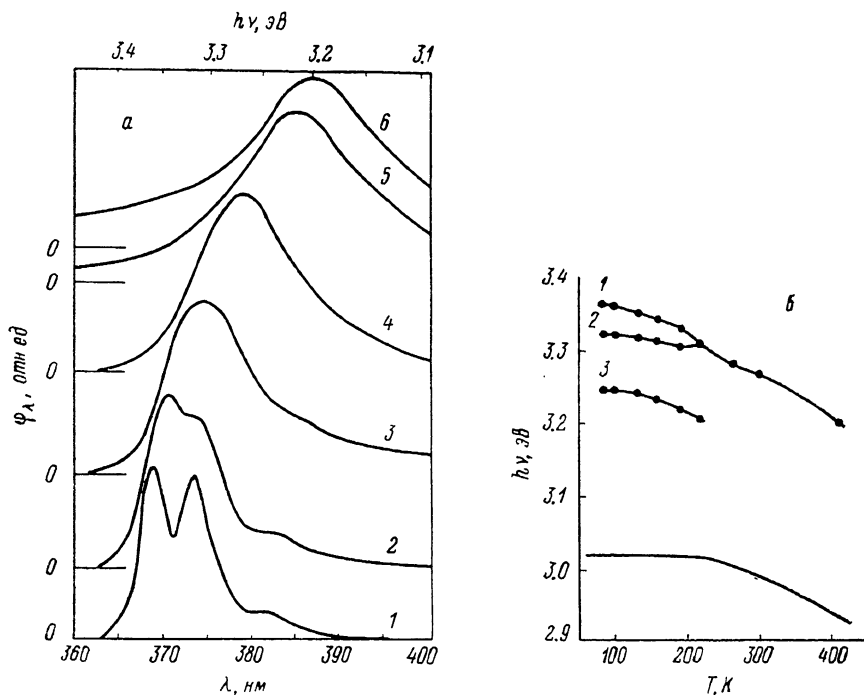


Рис. 2. Ультрафиолетовая фотолюминесценция эпитаксиального SiC-6H слоя.

$T, K$ : 1 — 83, 2 — 160, 3 — 218, 4 — 304, 5 — 383, 6 — 413. а — зависимость спектра от температуры (спектры приведены к равному максимуму), б — зависимость энергии максимумов линий люминесценции от температуры. 1—3 — УФ линии, нижняя кривая — температурная зависимость ширины экситонной запрещенной зоны SiC-6H [4].

в ультрафиолетовой области ( $h\nu = 3.1\text{—}3.4$  эВ, рис. 1); их положение и относительные интенсивности зависят от температуры и интенсивности возбуждения. При низкой температуре ( $\leq 100$  K) и малой интенсивности возбуждения в ультрафиолетовой части спектра присутствуют три линии с энергиями максимумов 3.25 эВ ( $\lambda_{\max} = 382$  нм), 3.32 эВ ( $\lambda_{\max} = 373$  нм) и 3.36 эВ ( $\lambda_{\max} = 369$  нм). Полуширина каждой из этих линий около 35 нм (рис. 2). Энергии максимумов этих УФ линий больше энергии запрещенной зоны политипа SiC-6H (при  $T=0$   $E_g \approx 3.1$  эВ), а для линии 3.36 эВ — больше ширины запрещенной зоны наиболее широкозонного политипа карбида кремния SiC-2H (при  $T=0$   $E_g \approx 3.3$  эВ [5]).

Повышение температуры при фиксированной интенсивности возбуждения приводит к сдвигу УФ линий в область меньших энергий и их уширению (рис. 2, а). Наблюдается также температурное тушение интенсивности линий, причем самая коротковолновая линия 369 нм тушится медленнее двух других. Температурный сдвиг и уширение УФ линий имеют существенно большую величину, чем температурный сдвиг и уширение линий аннигиляции свободного экситона в SiC-6H (рис. 2, б).

Увеличение интенсивности возбуждения люминесценции (при фиксированной температуре) приводит к изменениям в УФ спектре, аналогичным измене-

ниями, обусловленным ростом температуры при фиксированной плотности возбуждения), а именно к сдвигу УФ линий в длинноволновую область, их уширению и относительно более медленному тушению коротковолновой УФ линии 369 нм (рис. 3).

Легирование эпитаксиальных слоев SiC мелкими донорами (азот) и акцепторами (алюминий) сильно увеличивает интенсивность УФ линий, в то же время их положение и полуширина не меняются. При этом в не легированных специально образцах и в образцах, легированных слабо (концентрация доноров и акцепторов  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ ), УФ свечение сильно неоднородно по площади образца

и локализовано в небольших (меньше 1 мм $^2$ ) областях.

При сильном легировании азотом или алюминием (концентрация примесей  $\approx 1 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ ) интенсивность УФ линий при  $T=83$  К возрастает на 3 порядка и становится в 40 раз больше, чем интенсивность обычной краевой люминесценции в исследованных нами образцах SiC-6H с наибольшим квантовым выходом. Одновременно значительно возрастает и однородность распределения интенсивности УФ излучения по площади образца.

Аналогичные УФ линии наблюдаются также в монокристаллах карбида кремния политипов 15R и 4H, причем их энергетическое положение такое же, что и в SiC-6H.

Дальнейшее увеличение содержания Al и N в SiC приводит к образованию твердого раствора (SiC) $_{1-x}$ (AlN) $_x$  [6]; при высоком

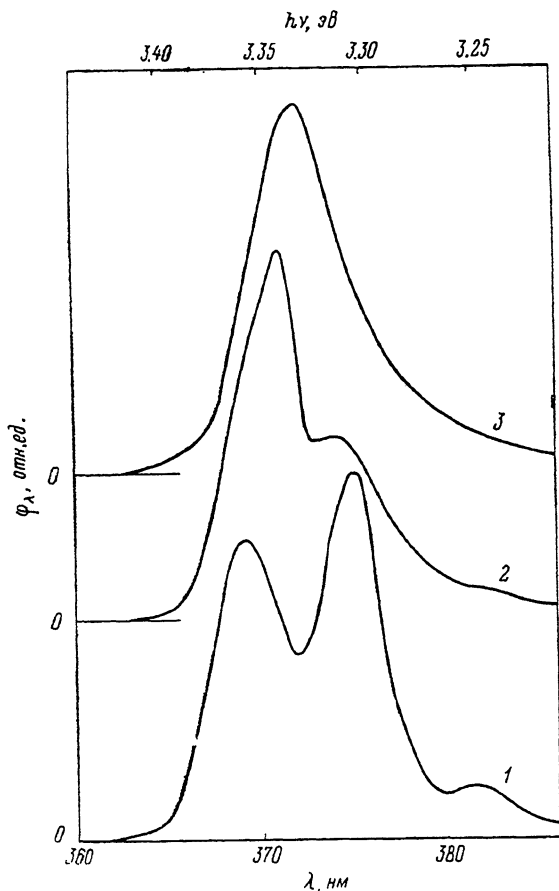


Рис. 3. Зависимость спектра УФ линий от интенсивности фотовозбуждения  $\Phi$  (в отн. ед.).

1 —  $\Phi_0$ , 2 —  $7 \Phi_0$ , 3 —  $250 \Phi_0$ .  $T=83$  К.

содержанию компоненты Al спектр катодолюминесценции (SiC) $_{1-x}$ (AlN) $_x$  представляет собой широкую полосу с  $h\nu_{\max} \approx 3.3$  эВ (рис. 1).

Таким образом, положение максимума широкой полосы люминесценции в (SiC) $_{1-x}$ (AlN) $_x$  с высоким содержанием Al почти такое же, что и у узких УФ линий в SiC-6H. Однако в отличие от УФ линий, наблюдаемых в SiC-6H, люминесценцию исследованного (SiC) $_{1-x}$ (AlN) $_x$  с большой шириной запрещенной зоны не удастся возбудить фотонами с энергией 3.7—4.0 эВ, поэтому для возбуждения использовался пучок электронов.

Можно высказать предположение, что по мере роста концентрации примесей Al и N в SiC и перехода от связей в решетке SiC к связям в твердом растворе (SiC) $_{1-x}$ (AlN) $_x$  образуется промежуточный тип связей в системе Si—C—Al—N. Эти связи проявляются в УФ люминесценции.

Авторы выражают благодарность В. А. Дмитриеву за предоставление эпитаксиальных структур SiC и (SiC) $_{1-x}$ (AlN) $_x$ . Мы признательны Ю. А. Водакову, W. J. Шоуке и В. И. Соколову за обсуждение результатов, Б. В. Царенкову за прочтение рукописи статьи и критические замечания.

Список литературы

- [1] Vodaikov Yu. A., Taigov Yu. M. // Topics in Appl. Phys. 1977. V. 17. P. 1—57.
- [2] Дмитриев В. А., Иванов П. А., Морозенко Я. В., Попов И. В., Челноков В. Е. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 4. С. 246—248.
- [3] Попов И. В., Сыркин А. Л., Челноков В. Е. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 4. С. 240—243.
- [4] Пихтин А. Н., Яськов Д. А. // ФТТ. 1970. Т. 12. В. 6. С. 1697—1704.
- [5] Choуке W. J. // Карбид кремния / Под ред. Г. Хениша и Р. Роя. М., 1972. С. 166—179.
- [6] Dmitriev V. A. // ICACSC'90 Abstracts. / Ed. by Haris. Washington, 11—13 April. 1990. P. 1—2.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 13.11.1990  
Принята к печати 15.11.1990

