

06.2; 06.3

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В 6Н - SiC, ЛЕГИРОВАННОМ Ga И N

А.И. Иванов, Е.Н. Мохов,  
В.Г. Одинг, В.С. Вавилов,  
Ю.А. Водаков, М.В. Чукичев

**Ga** в SiC, политипа 6Н, - активатор люминесценции в зелено-голубой ( $\lambda_{max} = 480-500$  нм) области спектра [1-3]. Ранее эта люминесценция могла наблюдаться только при низких температурах ( $T < 150$  К), выше которых происходило ее интенсивное тушение. Однако результаты настоящей работы показывают, что при определенном соотношении **Ga** и **N** достаточно эффективная „галлиевая“ люминесценция сохраняется вплоть до  $T \geq 300$  К.

Исследовались спектры катодолюминесценции (КЛ) и температурная зависимость интенсивности КЛ в максимуме спектра излучения при использовании режимов непрерывного и импульсного возбуждения и регистрации (НВР и ИВР соответственно). В режиме НВР КЛ измерялась при плотности падающего потока электронов до  $5 \cdot 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup> и энергии 10 кэВ, что соответствовало плотности генерации электронно-дырочных пар  $10^{21}-10^{22}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>. В режиме ИВР КЛ излучалась при возбуждении импульсным электронным пучком длительностью 0,8 мкс с частотой 200 Гц и энергий 40 кэВ (скорость генерации пар -  $10^{24}-10^{26}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>, что близко к уровню возбуждения при электролюминесценции).

Объектом исследования были эпитаксиальные слои (ЭС) 6Н - SiC, легированные **Ga** и **N** в процессе выращивания „сублимационным сэндвич-методом“ [4]. Концентрация легирующих примесей варьировалась в пределах  $10^{17}-10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Спектры КЛ всех образцов при  $T \leq 80$  К содержали характерную „галлиевую“ полосу люминесценции (ГПЛ), обусловленную присутствием примеси **Ga** с  $\lambda_{max} = 480-500$  нм [2]. Однако при более высоких температурах спектральные характеристики образцов различались.

Сравнение данных по температурной зависимости КЛ в режиме НВР в максимуме ГПЛ позволило условно разделить все изученные образцы на две группы (А и В). К группе А относились сильно компенсированные ЭС SiC с широким диапазоном уровня легирования **Ga** и **N**, а также образцы р- и п-типов проводимости с концентрацией **Ga**  $\leq 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Энергия активации тушения КЛ ( $\Delta E_T$ ) в них составляла 0,26 эВ, что близко к известным данным [2]. Вследствие низкой температуры начала тушения ( $T \approx 150$  К) и большой  $\Delta E_T$  образцы группы А практически не имели видимой ГПЛ в режиме НВР при  $T \geq 300$  К (рис. 1, кривая 1; рис. 2, спектр 1).

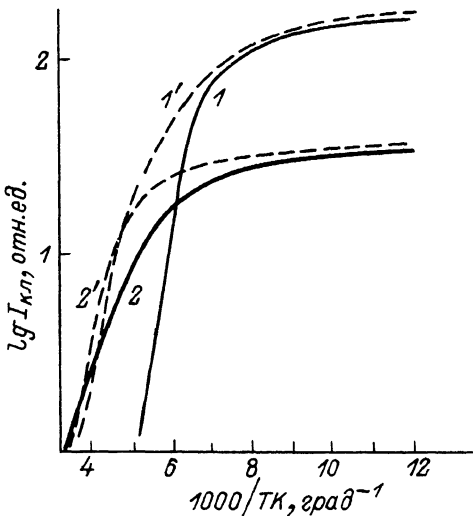


Рис. 1. Температурные зависимости КЛ в максимуме спектра излучения „галлиевой“ полосы ( $\lambda_{max} = 480-500$  нм) образцов  $SiC$ , легированных  $Ga$ , типов А (1, 1') и В (2 и 2') при непрерывном (1, 2) и импульсном (1', 2') возбуждении.

Группу В составили сильно легированные  $Ga$  и  $N$  образцы  $p$ -типа проводимости с концентрацией нескомпенсированных доноров ( $N_D - N_A$ )  $\approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Вследствие сдвига начала тушения КЛ в область повышенных температур и уменьшения  $\Delta E_T$  до 0,11 эВ образцы группы В обладали сравнительно эффективной ГПЛ в режиме НВР при  $T = 300$  К (рис. 1, кривая 2; рис. 2, спектр 2).

Другая картина наблюдалась при изучении температурной зависимости КЛ в режиме ИВР. Из рис. 1 (кривые 1', 2') видно, что происходит сдвиг температуры начала тушения КЛ к более высоким  $T$ , что, по-видимому, связано с ростом уровня возбуждения в режиме ИВР. Кроме этого, в обоих типах образцов характер температурного тушения на экспоненциальном участке почти одинаков и описывается  $\Delta E_T = 0,21$  эВ. Отметим, что в режиме ИВР ГПЛ при  $T \approx 300$  К наблюдается в обоих типах образцов (рис. 2, спектры 1' и 2'), а длинноволновая полоса излучения, заметная в режиме НВР, здесь полностью отсутствует.

Вышеприведенные экспериментальные данные можно непротиворечиво объяснить наличием донорно-акцепторных пар (ДАП)  $Ga - N$  с большим набором в них межпримесных расстояний. Большой уровень легирования азотом определяет резкое возрастание числа наиболее близких ДАП. Это прежде всего ведет к резкому уменьшению среднего времени жизни в ГПЛ за счет быстрой рекомбинации в тесных ДАП и некоторому сдвигу максимума ГПЛ в коротковолновую сторону. При этом существенно возрастает канал „галлиевой“ рекомбинации по сравнению с другими каналами, и уменьшается

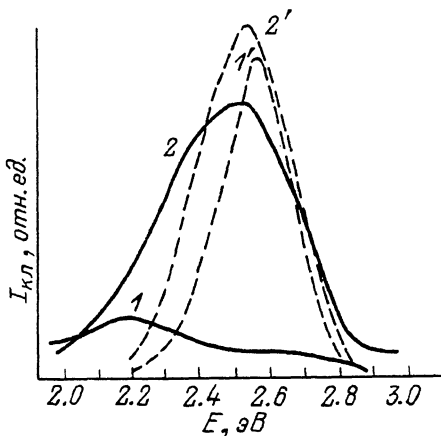


Рис. 2. Спектры высокотемпературной ( $T = 300$  К) КЛ образцов  $SiC$ , легированных  $Ga$ , типов А (1, 1') и В (2, 2') при непрерывном (1, 2) и импульсном (1', 2') возбуждении.

средняя энергия активации тушения этой полосы (в таких тесных ДАП первой может захватываться только дырка, тушение КЛ будет в среднем идти по энергии активации  $Ga$ , уменьшенной на довольно большой кулоновский член за счет отталкивания захватываемой дырки с близко расположенным положительно заряженным азотом). Следствием этого является существенное возрастание доли ГПЛ в НВР режиме при температурах, близких к комнатной (рис. 1, кривая 2; рис. 2, кривая 2).

Достаточно короткое и интенсивное импульсное возбуждение еще сильнее подчеркивает наличие быстрых каналов рекомбинации на тесных ДАП не только при сравнении разных полос КЛ (рис. 2, кривая 1 и 1' и 2 и 2'), но и в пределах одной ГПЛ, сдвигая ее в коротковолновую сторону.

Следует также учитывать влияние на ГПЛ других медленных каналов излучательной рекомбинации, обусловленных, в частности, присутствием фоновой примеси бора.

Как известно [6], эффективность высокотемпературной борной КЛ падает при  $C_N > 5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ , это дополнительно может способствовать росту интенсивности ГПЛ при  $T \gtrsim 300$  К в сильнолегированных образцах  $SiC$  с  $Ga$  и  $N$ .

В заключение следует отметить, что по временным и спектральным характеристикам катодолуминесценции в режиме ИВР близка к электролюминесценции в р-п-структурах на основе  $6H-SiC(Ga, N)$ .

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Х о л у я н о в Г.Ф. // ФТТ. 1965. Т. 7. В. 11. С. 3241-3248.

- [2] V o d a k o v Yu.A., L o m a k i n a G.A., M o k h o v E.N. et al. // Phys. St. Sol. 1976. V. 35. N 1. P. 37-42.
- [3] S u z u k i A., M a t s u n a m i H., T a n a k a T. // Jap. J. Appl. Phys. 1975. V. 14. N 6. P. 891-892.
- [4] V o d a k o v Yu. A., M o k h o v E.N., R a m m M.G., R o e n k o v A.D. // Krist. und Tehn. 1979. V. 14. N 6. P. 729-741.
- [5] В о д а к о в Ю.А., Г о н ч а р о в Е.Е., Л о м а к и н а Г.А. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 2. С.207-211.

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

Поступило в Редакцию  
15 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 17

12 сентября 1989 г.

07

## ЗОННАЯ ПЛАСТИНА АНИЗОТРОПНОГО ПРОФИЛЯ

Ш.Д. К а к и ч а ш в и л и, З.В. В а р д о с а н и д з е

Известные к настоящему времени зонные пластины Френеля имеют изотропный профиль [1, 2]. Эти устройства способны производить только амплитудно-фазовые преобразования светового поля, не влияя на состояние его поляризации. Как известно, анизотропные структуры, в частности дифракционные решетки анизотропного профиля и поляризационные голограммы, позволяют трансформировать и сепарировать свет по состоянию поляризации [3, 4]. С этой точки зрения существенный интерес представляет также возможность создания зонной пластины анизотропного профиля и исследование ее функциональных возможностей.

В предлагаемой работе описывается зонная пластина анизотропного профиля, получаемая путем регистрации на поляризационно чувствительном материале суммарной картины векторного сложения сферических, различно поляризованных, волн.

Для записи использовалось актиничное излучение *He-Cd* лазера ЛГ-61 ( $\lambda = 4416 \text{ \AA}$ ). В качестве регистрирующей среды был использован введенный в желатиновую матрицу азокраситель „Протравной чисто желтый” (ПЧЖ) [5]. Запись производилась посредством двух сферических волн различной расходимости с взаимно ортогональными колебаниями циркулярной поляризации. Плотность мощности актиничного излучения при этом составляла  $50 \text{ мВт/см}^2$ . Неразрушающее считывание в процессе записи производилось циркулярно поляризованным светом *He-Ne* лазера ( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ).