

ФИОЛЕТОВЫЙ SiC-4H-СВЕТОДИОД

Дмитриев В. А., Коган Л. М., Морозенко Я. В., Царенков Б. В.,
Челноков В. Е., Черенков А. Е.

Представлены электрические и электролюминесцентные характеристики и параметры светодиодов фиолетового свечения, изготовленных на основе карбида кремния политипа 4H.

p-n-Структура: подложка *n*-SiC-4H, содержащая азот (донор), и выращенный на ней бесконтейнерной жидкостной эпитаксией слой *p*-SiC-4H, легированный алюминием (акцептор).

p-n-Переход резкий, емкостное напряжение отсечки 2.9 В (293 К). Площадь *p-n*-перехода светодиодной меза-структуры порядка 10^{-3} см². Свет выводился через *n*-подложку.

Максимум спектра электролюминесценции расположен в фиолетовой области [$h\nu_m = 2.93$ эВ (293 К)]. Зависимость интенсивности люминесценции от тока близка к линейной. Внешний квантовый выход около $0.5 \cdot 10^{-4}$ (293 К) и уменьшается с ростом температуры. Сила света светодиодов с полушириной диаграммы направленности излучения 15° равна 0.15 мкд при токе 20 мА и 293 К (напряжение около 3.5 В). Быстродействие светодиода порядка 100 нс.

Созданием фиолетового светодиода завершается светодиодное освоение видимого спектра.

1. *Предварительные замечания.* Карбид кремния стал тем полупроводником, который позволил создать синие светодиоды [1, 2]. Этот полупроводник можно использовать и для фиолетовых светодиодов. Созданием светодиодов фиолетового свечения завершается светодиодное освоение всего видимого спектра.

Фиолетовая область спектра соответствует интервалу энергий фотонов $h\nu = 2.72 \div 3.1$ эВ ($\lambda = 455 \div 400$ нм), и, следовательно, из технологически освоенных политипов SiC для создания светодиода фиолетового свечения принципиально пригодны SiC-6H ($E_g \approx 3.1$ эВ) и SiC-4H ($E_g \approx 3.3$ эВ), поскольку спектры электролюминесценции *p-n*-структур на обоих политипах имеют полосы в фиолетовой области.

Сравнение изготовленных нами в настоящее время SiC-6H и SiC-4H *p-n*-структур показало, что SiC-4H *p-n*-структуры имеют больший квантовый выход фиолетовой электролюминесценции. Поэтому альтернатива — политип SiC-6H или политип SiC-4H — решена нами в пользу политипа 4H.

В данной работе изложена методика изготовления и представлены характеристики и параметры SiC-4H-светодиода фиолетового свечения.

2. *Создание p-n-структур и конструкция светодиода.* Светодиодная SiC-4H *p-n*-структура формировалась эпитаксиальным наращиванием *p*⁺-слоя карбида кремния политипа 4H на ориентированные монокристаллические подложки *n*-SiC-4H. Подложки содержали азот (донор); *p*⁺-слой легировался алюминием (акцептор).

Подложки, изготовленные по методу Лели, имели концентрацию некомпенсированных доноров $N_d - N_a \approx 10^{18}$ см⁻³. Плоскость подложек перпендикулярна кристаллографической оси *C*; площадь подложек 4×5 мм, толщина 0.4 мм.

Перед эпитаксией подложки химически травились (в расплаве KOH при 500 °C) для удаления нарушенного механической обработкой приповерхностного слоя; стравливался слой около 100 мкм.

Наращивание *p*⁺-слоя на подложку производилось методом бесконтейнерной жидкостной эпитаксии, в котором раствор-расплав Si—C находился во взве-

шенном состоянии в высокочастотном (200 кГц) электромагнитном поле, что исключало контакт раствора-расплава с технологической арматурой [3].

Для наращивания p^+ -слоя SiC-подложки погружались в раствор-расплав Si—C, содержащий 10 вес% Al. Вначале проводилось растворение приповерхностного слоя подложки при 1630 °С в течение 15 мин, затем раствор-расплав постепенно охлаждался до 1590 °С; при этом происходило наращивание p -слоя на обе стороны подложки. Для изготовления светодиодов использовался слой, выращенный на Si-границе (толщина слоя 10 мкм); слой на C-границе сошлифовывался.

На p -поверхность изготовленной эпитаксиальной структуры напылялись сплошные алюминиевые контакты диаметром 350 мкм, а затем методом реактивного ионно-плазменного травления [4] формировались меза-структуры (трав-

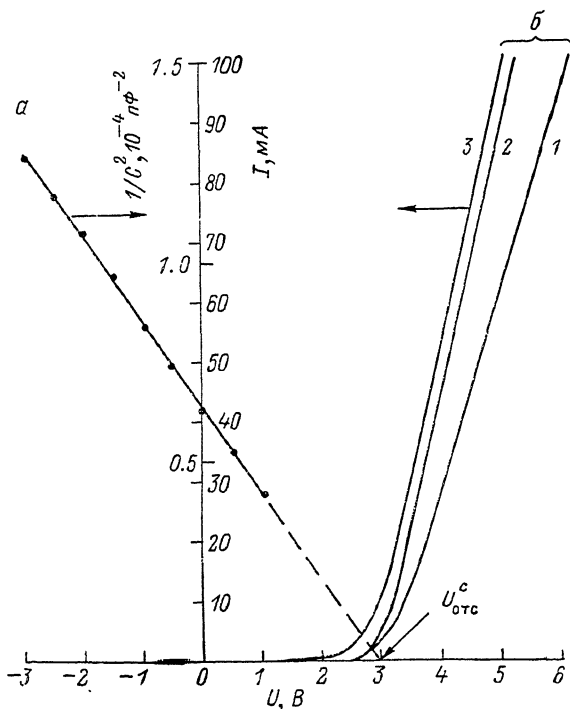


Рис. 1. Электрические характеристики SiC-4H p - n -структуры.

a — характеристика дифференциальная емкость (C)—напряжение (U) при 293 К; b — характеристики прямой ток (I)—напряжение (U); T , К: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 400.

ление проводилось с p -стороны на всю глубину эпитаксиального слоя; роль маски выполняли алюминиевые контакты).

На n -подложку наносился хромовый контакт с окном для вывода излучения.

Светоизлучающая эпитаксиальная p - n -структура закреплялась в держателе с линзой. Свет выводился через n -подложку и проходил через линзу, формирующую диаграмму направленности излучения с полушириной $\approx 15^\circ$.

3. *Характеристики и параметры светодиодов.* Измерения электрических и электролюминесцентных характеристик (ш. a — d , $з$) проводились на одной и той же открытой (без линзы) p - n -структуре в интервалах температур 213÷400 К и токов 0.5÷100 мА. Площадь p - n -перехода $1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$.

Статические характеристики при малых токах измерены на постоянном токе, а при больших — на импульсах, чтобы предотвратить разогрев структуры; длительность импульсов 10 мкс, скважность 10÷10³.

На основе этой структуры был изготовлен светодиод и проведены измерения (на постоянном токе) абсолютного значения внешнего квантового выхода и силы света (ш. e , $ж$).

a) Характеристика дифференциальная емкость (C)—напряжение на p - n -структуре (U) (рис. 1, a) линейна в координатах $1/C^2$ — U , что свидетельствует

о резком $p-n$ -переходе. Емкостное напряжение отсечки около 2.9 В (293 К); ширина слоя объемного заряда при нулевом смещении 0.07 мкм; приведенная концентрация доноров и акцепторов $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

б) Характеристика прямой ток (I)—напряжение (U) (рис. 1, б) при $U \geq E_c/q$ практически линейна. Остаточное дифференциальное сопротивление структуры около 20 Ом ($\sim 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) при 293 К; падение напряжения при токе 20 мА (плотность тока 70 А/см^2) составляет 3.5 В (293 К).

Напряжение электрического пробоя $p-n$ -структур около 50 В.

в) Спектр электролюминесценции (рис. 2) сосредоточен в основном в фиолетовой области.

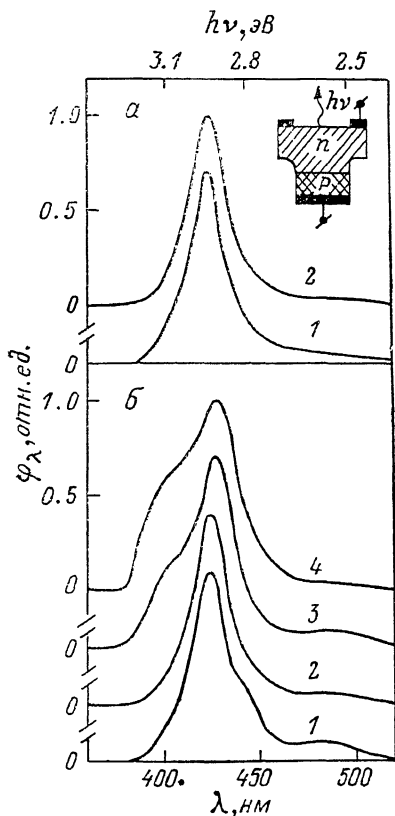


Рис. 2. Спектры электролюминесценции SiC-4H $p-n$ -структуры.

а — зависимость спектра от тока I при $T=293 \text{ К}$; I , мА: 1 — 20, 2 — 100; б — зависимость спектра от температуры T при $I=20 \text{ мА}$; T , К: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 373, 4 — 400; Φ_λ — спектральная плотность потока фотонов. Спектры приведены к равному максимуму. На вставке — SiC-4H $p-n$ -структура.

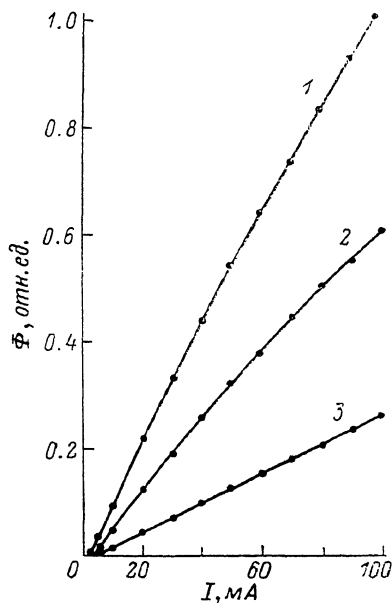


Рис. 3. Характеристики поток фотонов (Φ)—ток (I) SiC-4H $p-n$ -структуры при разных температурах.

T , К: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 400.

В интервале температур $213 \div 300 \text{ К}$ (ток $10 \div 100 \text{ мА}$) спектр состоит из фиолетовой полосы с энергией максимума $h\nu_m = 2.93 \text{ эВ}$ ($\lambda_m = 423 \text{ нм}$) и полушириной $\Delta h\nu = 0.15 \text{ эВ}$; при токе 20 мА и 293 К в фиолетовой части спектра излучается 80 % фотонов.

Увеличение температуры до 400 К приводит к уширению спектра ($\Delta h\nu = 0.31 \text{ эВ}$ при 400 К) за счет появления еще одной полосы уже в ультрафиолетовой области.

з) Характеристика поток фотонов (Φ)—прямой ток (I) (рис. 3) измерялась на импульсах (изотермический режим).

При низких температурах (от 213 до 293 К) $\Phi-I$ -характеристика сублинейна. При более высоких температурах она становится линейной.

д) Внешний квантовый выход электролюминесценции $\eta \equiv q\Phi/I$ слабо зависит от тока в интервале от 20 до 100 мА (рис. 4, а) и сильно зависит от температуры (рис. 4, б). С ростом температуры от 213 до 400 К η уменьшается в 5 раз (при возбуждении электролюминесценции импульсным током 20 мА).

е) Абсолютное значение внешнего квантового выхода светодиода при температуре 293 К около $5 \cdot 10^{-5}$ (ток 20 мА).

ж) Сила света измерена для светодиода с полушириной диаграммы направленности 15° . При температуре 293 К и токе 20 мА сила света равна 0.15 мкд.

з) Переходная характеристика электролюминесценции измерялась при токе 20 мА и 293 К; временное разрешение установки ≈ 30 нс.

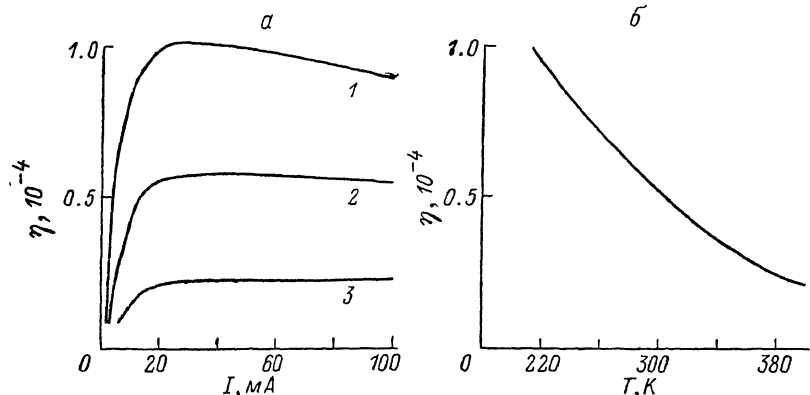


Рис. 4. Внешний квантовый выход электролюминесценции (η) SiC-4H *p-n*-структуры. а — зависимость η от тока I при разных температурах; T , К: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 400; б — зависимость η от температуры при токе 20 мА.

Нарастание интенсивности света до уровня 0.9 от стационарного (при включении прямого тока) и спад до уровня 0.1 (при выключении тока) происходят за время порядка 100 нс (рис. 5).

В настоящее время промышленность выпускает светодиоды, полосы излучения которых заполняют весь видимый диапазон, за исключением фиолетовой

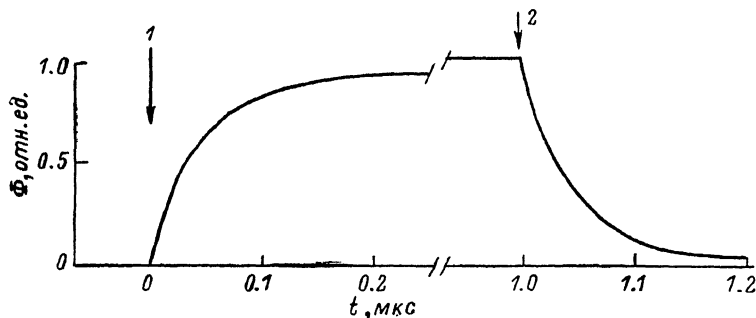


Рис. 5. Переходная характеристика электролюминесценции SiC-4H-светодиода при 293 К. 1 и 2 — моменты включения и выключения прямого тока.

части спектра. Для областей от инфракрасной вплоть до зеленой используются светодиоды на основе $A^{III}B^V$; для синей области недавно разработаны SiC-6H-светодиоды. Теперь благодаря созданию фиолетового SiC-4H-светодиода диапазон полупроводниковой люминесцентной электроники расширился на всю видимую область.

Авторы благодарят А. Л. Сыркина за ионно-плазменное формирование SiC-меза-структур и изготовление контактов к ним. Мы признательны И. Д. Коваленко и Д. К. Скрыннику за подготовку к эпитаксии карбид-кремниевых подложек, Т. А. Сидоровой и И. В. Коркицу за помощь в проведении эпитаксии.

Л и т е р а т у р а

- [1] Light Emitting Diodes. Short Form Catalog, 1986/1987. Ordering N B3-B3303-x-x-7600-Siemens, München, 1986. 14 p.
- [2] Вишнева Е. И., Дмитриев В. А., Коваленко И. Д., Коган Л. М., Сыркин А. Л., Морозенко Я. В., Царенков Б. В., Челноков В. Е. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 664—669.

- [3] Дмитриев В. А., Иванов П. А., Коркин И. В., Морозенко Я. В., Попов И. В., Сидорова Т. А., Стрельчук А. М., Челноков В. Е. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 4. С. 238—241.
- [4] Попов И. В., Сыркин А. Л., Челноков В. Е. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 4. С. 240—243.

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

Получена 14.06.1988
Принята к печати 22.07.1988
