

Исследование структур $n^+6H/n3C/p^+6H\text{-SiC}$, выращенных методом сублимационной эпитаксии

© А.А. Лебедев[¶], А.М. Стрельчук, С.Ю. Давыдов, А.Е. Черенков, А.Н. Кузнецов, А.С. Трегубова, Л.М. Сорокин, М.П. Щеглов, А.В. Садохин, С. Йонеда*, Ш. Нишино*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Технологический институт Киото, Мацугасаки,
606-8585 Киото, Япония

(Получена 18 апреля 2006 г. Принята к печати 28 апреля 2006 г.)

Впервые методом сублимационной эпитаксии получена структура $6H(n^+)/3C(n)/6H(p^+)\text{-SiC}$, на основе которой изготовлены меза-диоды и проведено исследование их электрических характеристик. Обнаружено, что в спектре инжекционной электролюминесценции данных диодов доминирует полоса в зеленой области спектра, которая близка по характеристикам к полосе, связанной с рекомбинацией свободного экситона в объемном образце $3C\text{-SiC}$, но сдвинута в коротковолновую область на ~ 0.06 эВ. Подобный эффект наблюдался ранее для треугольных квантовых ям в гетеропереходе $n^+6H\text{-SiC}/p3C\text{-SiC}$. Проведенный анализ экспериментальных результатов показал, что данную структуру можно рассматривать как два независимых гетероперехода. Наблюдавшийся спектр электролюминесценции может быть обусловлен излучательной рекомбинацией у гетерограницы $n^+6H\text{-SiC}/n3C\text{-SiC}$.

PACS: 81.15.Hi, 85.30.Kk, 78.60.Fi, 73.40.Lq

1. Введение

В последние годы усилился интерес к получению и исследованию гетероструктур на основе различных политипов SiC [1–3], так как на контакте гексагонального $NH\text{-SiC}$ ($N = 2, 4, 6, \dots$) и кубического $3C\text{-SiC}$ политипов возможно получение двумерного электронного газа (2DEG) и создание транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT). Согласно существующим теоретическим оценкам [4], подобные HEMT могут превосходить по своим параметрам аналогичные приборы на основе GaN–AlGaIn. Кроме того, создание прослойки кубического политипа SiC внутри гексагональной матрицы позволяет получить систему локальных уровней, допускающих возможность излучения в синей области спектра [5–7]. К настоящему времени синее излучение удалось наблюдать только для квантовых ям (QW), спонтанно образующихся в сильно легированных образцах $n\text{-SiC}$ после отжига при высоких температурах [1]. Контролируемым образом QW в SiC были получены молекулярно-лучевой эпитаксией [8]. В спектре фотолюминесценции подобных образцов максимум излучения находился в зеленой области спектра, что было связано с достаточно большой шириной прослойки $3C$ и влиянием эффекта спонтанной поляризации.

Ранее мы сообщали о результатах исследований структур $n6H/p^+3C\text{-SiC}$ [3,9], $n^+6H/p^-3C\text{-SiC}$ [10,11] и $n^+6H/n3C\text{-SiC}$ [12], выращенных сублимационной эпитаксией в вакууме (СЭВ). При исследовании спектров электролюминесценции гетероструктур с $p\text{-}n$ -переходом $n^+6H\text{-SiC}/p3C\text{-SiC}$ [10,11] было обнаружено смещение линии излучения свободного экситона в $3C\text{-SiC}$ на 0.06 эВ в коротковолновую область. Подобное

смещение находится в хорошем согласии с теоретическими оценками положения уровня основного состояния в треугольной QW на гетерогранице в $3C$ -области [7]. Цель настоящей работы — исследование свойств многослойной гетероструктуры $n^+6H/n3C/p^+6H\text{-SiC}$, полученной методом СЭВ на коммерческой подложке $n^+6H\text{-SiC}$ с ориентацией (0001).

2. Структурные исследования

Структурные характеристики выращенных эпитаксиальных слоев определялись методами рентгеновской топографии и дифрактометрии в геометрии отражения по Брэггу в CuK_α излучении.

Рентгеновские топограммы снимались в отражении (101.10) для $6H\text{-SiC}$. В этих же условиях съемки реализуются отражения (311) и (331), соответствующие структуре $3C\text{-SiC}$. Анализ топограмм показал, что первый эпитаксиальный слой наряду с политипом $6H\text{-SiC}$ (n -типа проводимости с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (4-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) содержит значительное количество включений $3C\text{-SiC}$ разного размера (темные области на рис. 1, а). Вне области выращенного слоя (область А) на топограмме выявляется дислокационная структура подложки, состоящая из базисных дислокаций ячеистого типа с плотностью дислокаций $\rho \leq 10^4 \text{ см}^{-2}$ и характеризующая структурное несовершенство подложки. Дислокации такого типа не наследуются эпитаксиальными слоями.

Формирование $p\text{-}n$ -перехода осуществлялось во втором эпитаксиальном процессе в результате выращивания $p^+(\text{Al})$ -слоя с концентрацией нескомпенсированных акцепторов $N_a - N_d = (1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Перед созданием эпитаксиального слоя p -типа проводилось сублимацион-

[¶] E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

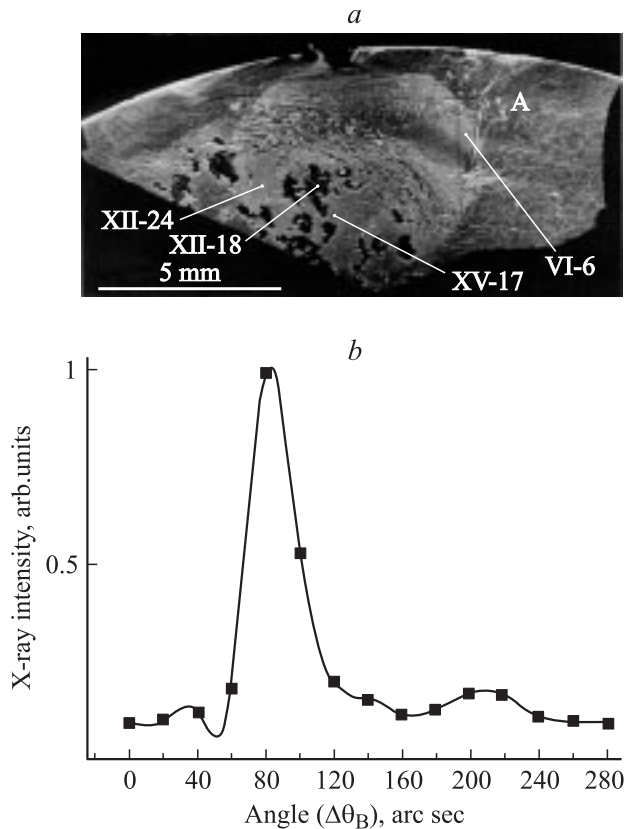


Рис. 1. *a* — рентгеновская топограмма (отражение (101_{-10}) $6H-SiC$, CuK_{α} излучение), *b* — двухкристалльная кривая образца $6H-SiC$ после роста эпитаксиальных слоев n - и p -типа. Стрелками на топограмме указаны участки, где были созданы $p-n$ -структуры. А — область подложки без слоев.

ное травление *in situ* эпитаксиальной структуры n^+-n , что приводило к уменьшению толщины слоя n -типа проводимости. В итоге толщина $3C$ -области достигала значения 2–3 мкм, p^+6H -области — 1–2 мкм. Из-за малой толщины p -слоя дополнительного контраста от него на топограмме не выявлялось. Для доказательства присутствия и выявления p -слоя использовалась рентгеновская дифрактометрия.

Дифрактометрические измерения проводились на базе трехкристалльного рентгеновского спектрометра. Была получена кривая качания пика дифракции для рефлекса $(00012)_{CuK_{\alpha 1}}$ подложки $6H-SiC$. Профиль двухкристалльной кривой качания содержит два максимума, один из которых (основной) характеризует пик от подложки и второй (дополнительный) — пик от слоя (рис. 1, *b*). При анализе углового распределения интенсивности пиков с помощью трехкристалльной схемы дифракции были определены постоянные решетки структур, отвечающих этим максимумам. Измерения показали, что основной пик соответствует структуре подложки $6H-SiC$ ($C/n = 2.5179$), а дополнительный пик смещен от основного на величину ($\Delta\theta = 120$ угл. сек) в сторону больших значений угла дифракции, что соответствует слою с меньшим межплоскостным расстоянием $\langle d \rangle$. Параметры решетки

для структур $3C-SiC$ и $p-6H-SiC$ как раз имеют меньшие значения, но отличаются по величине. Для политипа $3C-SiC$ расчетное значение величины $\langle d \rangle/d = 9.4 \cdot 10^{-4}$. Измерения показывают, что слоевой пик имеет отклонение $\langle d \rangle/d = 7.5 \cdot 10^{-4}$. Это положение пика отвечает p -слою $6H-SiC$, поскольку легирование Al приводит к уменьшению параметра решетки.

Омические контакты к p^+ -слою были изготовлены магнетронным напылением Al и Ti и последующим вжиганием при $1100^\circ C$. Меза-структуры площадью $\sim 10^{-3} \text{ см}^2$ (диаметр структур 330 мкм) были сформированы реактивным ионно-плазменным травлением карбида кремния в SF_6 на глубину 5–7 мкм. Таким образом, на одной подложке были получены как гомодиоды $n^+6H/n-6H/p^+6H-SiC$ (вне включений $3C-SiC$), так и гетеродиоды $n^+6H/n-3C/p^+6H-SiC$.

3. Электрические исследования

После формирования диодных меза-структур их прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и спектры инжекционной электролюминесценции (ИЭЛ) измерялись для различных областей эпитаксиального слоя. Прямые ВАХ лучших структур (в области экспоненциальной зависимости тока от напряжения вне включений $3C-SiC$) были близки к ВАХ идеальных $6H-SiC$ $p-n$ -гомоструктур: при напряжении около 40 В наблюдался резкий пробой. Гетероструктуры в области включений $3C-SiC$ характеризовались большими избыточными токами как при прямом, так и при обратном

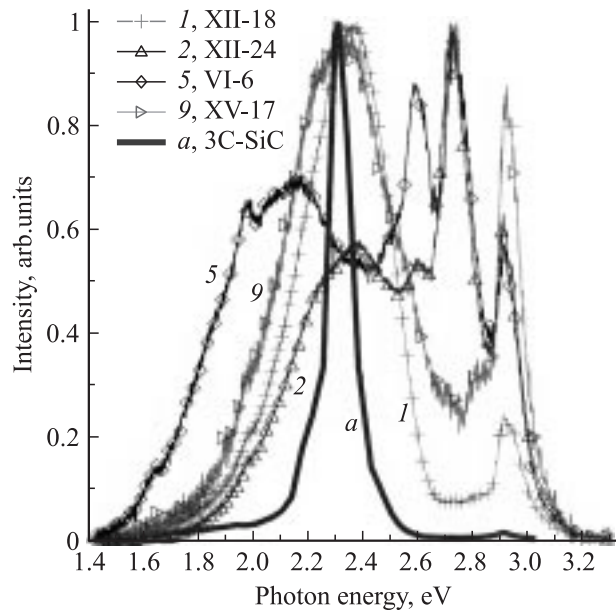


Рис. 2. Спектры инжекционной электролюминесценции различных $p-n$ -структур (1, 2, 5, 9) при прямых токах 80 (1) и 100 мА (2, 5, 9), а также $3C-SiC$ $p-n$ -структуры „высокого качества“ при прямом токе 10 мА (а) [3]; площадь диодов $\sim 10^{-3} \text{ см}^2$ (1, 2, 5, 9) и 10^{-4} см^2 (а); комнатная температура.

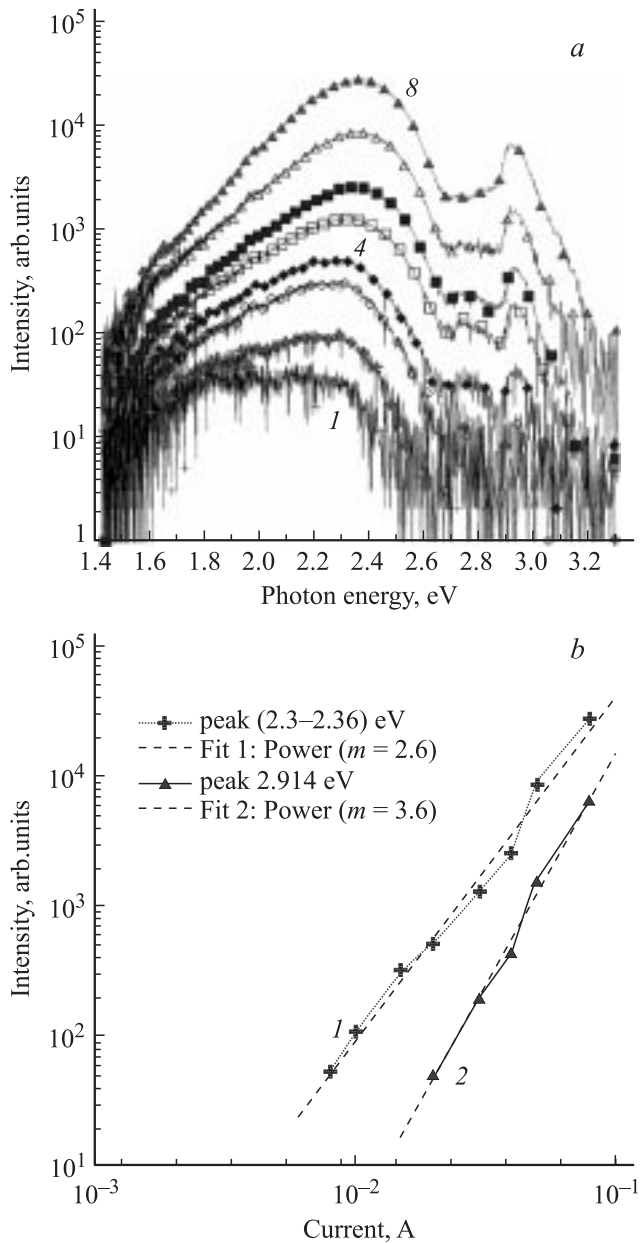


Рис. 3. *a* — спектры ИЭЛ p - n -структуры XII-18 при различных прямых токах, мА: 1 — 8, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20, 5 — 30, 6 — 40, 7 — 50, 8 — 80 (см. также кривую 1 на рис. 2); *b* — зависимость интенсивности ИЭЛ при $h\nu_{\max}$ от прямого тока I для двух полос ИЭЛ, p - n -структура XII-18, m — показатель степени в зависимости $L \propto I^m$. Комнатная температура.

смещениях. Подробный анализ ВАХ данных структур представлен в работе [13].

Характерной особенностью p - n -структур, находящихся в области включений $3C$ -SiC, являлось преобладание ИЭЛ в зеленой области спектра ($h\nu_{\max} = 2.35$ эВ; рис. 2, кривые 1, 2, 9). Напротив, для p - n -структур вне области включений $3C$ -SiC зеленая полоса ИЭЛ не наблюдалась (кривая 5 на рис. 2). Было обнаружено смещение пика излучения зеленой полосы от $h\nu_{\max} \approx 2.31$ эВ при малых

токах до $h\nu_{\max} \approx 2.36$ эВ при больших токах (рис. 3, *a*). Такие факты, как зависимость интенсивности L зеленой полосы от тока I вида $L \propto I^m$ ($m > 2$ в широком диапазоне токов (рис. 3, *b*)), а также рост высоты пика L при нагреве структуры джоулевым теплом, позволяют предположить, что при больших токах данная электролюминесценция была обусловлена аннигиляцией свободного экситона в $3C$ -SiC (кривая *a* на рис. 2). Однако положение максимума данной ИЭЛ было сдвинуто в коротковолновую область по сравнению с положением максимума ИЭЛ, обусловленного аннигиляцией свободного экситона в объемном $3C$ -SiC. Аналогичный сдвиг максимума экситонной ИЭЛ наблюдался ранее в структурах n^+ - $6H/n$ - $3C$ -SiC, выращенных методом СЭВ [5]. Этот сдвиг был объяснен квантово-размерными эффектами на гетерогранице $6H/3C$ -SiC [7].

При больших токах во всех p - n -структурах также наблюдался пик ИЭЛ с $h\nu_{\max} \approx 2.9$ эВ, обычно приписываемый рекомбинации свободного экситона в объемном образце $6H$ -SiC. Два других пика в голубой части спектра ($h\nu_{\max} \approx 2.6$ и 2.72 эВ) могут быть связаны с рекомбинацией в $6H$ -SiC с участием акцепторных уровней алюминия [14].

4. Обсуждение результатов

Рассмотрим энергетическую структуру системы (рис. 4). Если, как в [15], принять для $3C$ -SiC электронное сродство $\chi_2 = 4$ эВ, то для $6H$ -SiC в соответствии с работой [7] получим $\chi_1 = 3.45$ эВ. Тогда разрывы зон проводимости составят $\Delta E_c = 0.55$ эВ, а валентных зон $\Delta E_v = 0.05$ эВ, так как $E_{g2} = E_g(3C) = 2.4$ эВ и $E_{g1} = E_g(6H) = 3$ эВ.

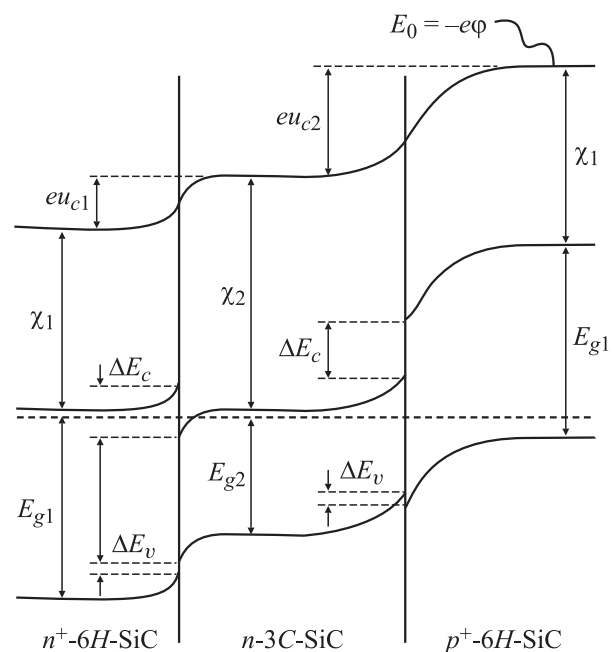


Рис. 4. Зонная диаграмма структуры n^+ - $6H$ -SiC/ n - $3C$ -SiC/ p^+ - $6H$ -SiC.

Как видно из рисунка, следует ожидать образования треугольной квантовой ямы на гетерогранице $n^+-6H/n-3C$, которая должна быть подобна яме, исследовавшейся в работе [7]. Точный расчет энергии уровня в яме сделать невозможно из-за отсутствия данных об уровне легирования слоя $3C-SiC$ вблизи гетерограницы с $6H-SiC$. Можно, однако, предположить, что энергия локального уровня в яме будет порядка определенной в работе [7].

Тогда результаты эксперимента по исследованию ЭЛ структур $n^+-6H/n-3C/p^+-6H-SiC$ можно объяснить следующим образом. В области малых токов (низкий уровень инжекции) значительная часть дырок рекомбинирует внутри слоя $n-3C-SiC$, не доходя до гетерограницы $n^+-6H/n-3C$. Эта рекомбинация приводит к излучению свободного экситона ($h\nu \approx 2.29$ эВ [16]). С увеличением плотности прямого тока растет доля дырок, достигших гетерограницы, что приводит к увеличению интенсивности пика $h\nu \approx 2.36$ эВ. В результате в спектре ЭЛ исследовавшихся структур наблюдалась широкая полоса излучения в зеленой области спектра, максимум которой с увеличением прямого тока смещался от 2.31 до 2.35 эВ. При больших плотностях тока (высокий уровень инжекции) часть дырок проходит весь слой $3C-SiC$ и инжектируется в $n^+-6H-SiC$, что приводит к появлению в спектре ЭЛ полос в синей области спектра.

5. Заключение

Таким образом, в ходе настоящей работы методом СЭВ впервые была получена гетероструктура $n^+-6H/n-3C/p^+-6H-SiC$. На основе данных гетероструктур были изготовлены меза-диоды и проведено исследование их электрических характеристик. Обнаруженное в спектре ИЭЛ диодов смещение линии излучения свободного экситона в $3C-SiC$ в коротковолновую область можно объяснить излучательной рекомбинацией на гетерогранице $n^+-6H/n-3C$. В исследовавшейся структуре ширина прослойки $3C$ была слишком велика, чтобы в ней проявлялись квантово-размерные эффекты. Можно предположить, что дальнейшее совершенствование сублимационной технологии позволит уменьшить ширину ямы и получить излучение в синей области спектра, как это наблюдалось для спонтанно формирующихся QW в сильно легированном SiC.

Работа поддержана грантом РФФИ N 04-02-16632a.

Список литературы

- [1] R.S. Okojie, M. Xhang, P. Pirouz, S. Tumakha, G. Jessen, L. Brillson. Appl. Phys. Lett., **79** (19), 3056 (2001).
- [2] A. Fissel, U. Kaiser, B. Schröter, W. Richter, F. Bechstedt. Appl. Surf. Sci., **184** (1), 37 (2001).
- [3] A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, D.V. Davydov, N.S. Savkina, A.S. Tregubova, A.N. Kuznetsov, V.A. Soloviev, N.K. Poletaev. Appl. Surf. Sci., **184** (4), 419 (2001).
- [4] V.M. Polyakov, F. Schwierz. J. Appl. Phys., **98**, 023 709 (2005).
- [5] J. Camasesel, S. Juillaguet. Mater. Sci. Forum, **483-485**, 331 (2005).
- [6] S. Juillaguet, J. Camasesel. Mater. Sci. Forum, **483-485**, 335 (2005).
- [7] С.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев, О.В. Посредник. ФТП, **39** (12), 1440 (2005).
- [8] A. Fissel. Phys. Rep., **379** (1), 149 (2003).
- [9] A.M. Strel'chuk, N.S. Savkina, A.N. Kuznetsov, A.A. Lebedev, A.S. Tregubova. Mater. Sci. Engin., **B91-92**, 321 (2002).
- [10] A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, N.S. Savkina, E.V. Bogdanova, A.S. Tregubova, A.N. Kuznetsov, D.V. Davydov. Mater. Sci. Forum. **433-436**, 427 (2003).
- [11] N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk, L.M. Sorokin, G.N. Mosina, A.S. Tregubova, V.A. Solov'ev, A.A. Lebedev. Mater. Sci. Forum, **433-436**, 293 (2003).
- [12] А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, Н.С. Савкина, Е.В. Богданова, А.С. Трегубова, А.Н. Кузнецов, Л.М. Сорокин. Письма ЖТФ, **28** (23), 78 (2002).
- [13] A.M. Strel'chuk, A.A. Lebedev, A.E. Cherenkov, A.N. Kuznetsov, A.S. Tregubova, M.P. Scheglow, L.M. Sorokin, S. Yoneda, S. Nishino. Sol. St. Phenomena, **108-109**, 713 (2005).
- [14] А.А. Лебедев. ФТП, **33** (2), 129 (1999).
- [15] M.J. Bozak. Phys. Status Solidi B, **202** (2), 549 (1997).
- [16] Ю.М. Алтайский, С.Ф. Авраменко, О.А. Гусева, В.С. Киселев. ФТП, **13**, 1978 (1979).

Редактор Л.В. Беляков

An investigation of $n^+-6H/n-3C/p^+-6H-SiC$ structures grown by sublimation epitaxy

A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, A.E. Cherenkov, A.N. Kuznetsov, A.S. Tregubova, M.P. Scheglow, L.M. Sorokin, S. Yoneda*, S. Nishino*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki,
606-8585 Kyoto, Japan

Abstract A structure $n^+-6H/n-3C/p^+-6H-SiC$ was firstly grown by sublimation epitaxy. Mesa-diodes were prepared on a basis of the structure and investigation of electrical characteristics were made. The electroluminescence spectrum of the diodes was found to have a dominate band in the green spectral region, which was similar in spectral characteristics to free-exciton recombination band in $3C-SiC$ but shifted to the short wavelength region up to ~ 0.06 eV. The same effect was observed for triangle quantum wells in heterojunction $n^+-6H-SiC/p-3C-SiC$. The analysis of the results obtained has shown that such a SiC-structure can be consider as two independent heterojunctions. Observed electroluminescence spectrum can be conditioned by a radiative recombination at $n^+-6H-SiC/m-3C-SiC$ heteroboundary.