

Исследование свойств двумерного электронного газа в гетероструктурах p^- -3C-SiC/ n^+ -6H-SiC при низких температурах

© А.А. Лебедев[¶], Д.К. Нельсон, Б.С. Разбирин, И.И. Сайдашев, А.Н. Кузнецов, А.Е. Черенков

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

(Получена 3 марта 2005 г. Принята к печати 14 марта 2005 г.)

Проведено исследование спектров фотолюминесценции и магнитосопротивления эпитаксиальных структур p^- -3C-SiC/ n^+ -6H-SiC при температурах 6–80 К. Проведенные исследования показали влияние гетероперехода как на спектр фотолюминесценции, так и на величину сопротивления. Однако недостаточное структурное совершенство эпитаксиальных структур не позволили пока получить эффекты, „классические“ для структур с двумерным газом. Следует ожидать, что усложнение техники эксперимента, а также оптимизация ростовых и послеростовых технологий SiC позволят это сделать в ближайшем будущем.

1. Введение

В последние годы был опубликован ряд работ, посвященных получению и исследованию гетероструктур между различными политипами SiC [1–7]. В работе [1] были впервые исследованы электрические характеристики гетероструктур p -3C-SiC/ n -6H-SiC и на основе полученных данных построена энергетическая диаграмма, которая оказалась близка к теоретически ожидаемой. Из этой диаграммы, в частности, следовала принципиальная возможность получения двумерного электронного газа (2DEG) на гетерогранице этой пары полупроводников. Для реализации 2DEG методом сублимации в вакууме были изготовлены структуры с „модулированным легированием“, т. е. структуры, в которых широкозонный полупроводник n -типа проводимости (6H-SiC) имел высокий уровень легирования, а узкозонный (3C-SiC) — проводимость, близкую к собственной [8]. В спектре излучения диодов, изготовленных на основе данных структур, наблюдалось смещение в коротковолновую область полосы люминесценции, связанной с рекомбинацией свободного экситона в 3C-SiC. Наблюдавшийся экспериментально сдвиг находился в хорошем согласии с расчетным значением, полученным для смещения локализованного состояния в двумерной квантовой яме [8,9].

В настоящей работе проведено исследование спектров фотолюминесценции и гальваномагнитных эффектов (явлений переноса) в исходных эпитаксиальных структурах p^- -3C-SiC/ n^+ -6H-SiC до формирования меза-структур гетеродиодов.

2. Фотолюминесценция

Исследованные структуры получены методом сублимационной эпитаксии в вакууме. Аналогично [5,8] слабо легированный ($N_a - N_d \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) слой p -3C-SiC выращивался непосредственно на сильно легированной ($N_d - N_a \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) подложке 6H-SiC.

Спектры фотолюминесценции регистрировались при температуре жидкого гелия ($T = 6 \text{ К}$) и жидкого азота ($T = 80 \text{ К}$). Для возбуждения фотолюминесценции использовалось излучение импульсного азотного лазера ЛГИ-505 (длина волны излучения 337.1 нм, длительность импульса 10 нс, частота повторения 1 кГц, мощность в импульсе 5 кВт). Излучение лазера фокусировалось на образец в пятно диаметром $\sim 1 \text{ мм}$. Плотность возбуждения можно было изменять с помощью предварительно откалиброванных фильтров в диапазоне от 1 до 100 кВт/см². Перед проведением исследований была измерена спектральная кривая чувствительности установки, и спектры были исправлены в соответствии с этой кривой.

В спектре люминесценции исследованных гетероструктур доминировала хорошо известная полоса с энергией максимума 2.64 эВ, связываемая с рекомбинацией на донорно-акцепторных парах N–Al в 6H-SiC. Наряду с этой полосой в длинноволновой части спектра (1.9–2.2 эВ) наблюдалась полоса, в которой можно выделить четыре особенности с энергиями 1.95, 2.02, 2.06 и 2.13 эВ. Обращает на себя внимание тот факт, что

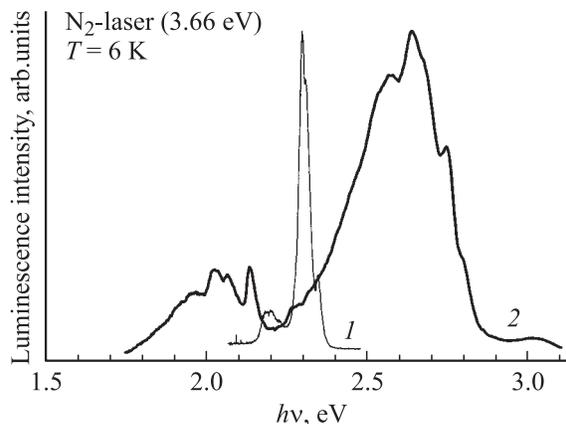


Рис. 1. Спектры ФЛ исследованных образцов при $T = 6 \text{ К}$. 1 — монокристалл 3C-SiC, 2 — гетероструктура p^- -3C-SiC/ n^+ -6H-SiC.

[¶] E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

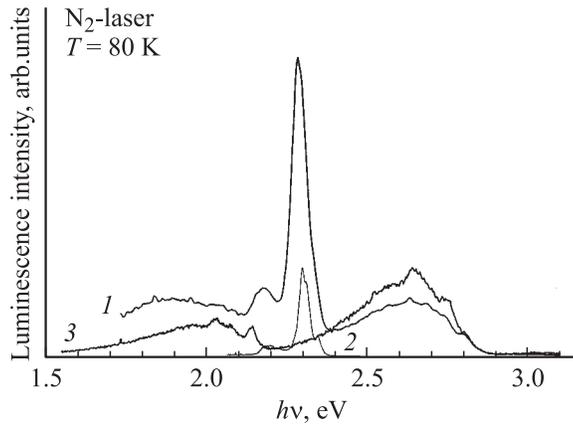


Рис. 2. Спектры ФЛ исследованных образцов при $T = 80$ К. 1 — гетероструктура $n\text{-}3\text{C-SiC}/n^+\text{-}6\text{H-SiC}$ (без модулированного легирования); 2 — монокристалл 3C-SiC , 3 — гетероструктура $p^-\text{-}3\text{C-SiC}/n^+\text{-}6\text{H-SiC}$.

эта полоса расположена ниже по энергии, чем ширина запрещенной зоны 3C-SiC (2.39 эВ) — узкозонного материала в гетероструктуре, — и соответственно ниже, чем характерная структура в спектре люминесценции объемного образца 3C-SiC (рис. 1).

Были также исследованы спектры фотолюминесценции изотипной гетероструктуры $n\text{-}3\text{C-SiC}/n^+\text{-}6\text{H-SiC}$, в которой не должно происходить образование потенциальной ямы для электронов на гетерогранице. Спектр данного образца заметным образом отличался от рассмотренного выше — в нем по-прежнему наблюдалась полоса с максимумом 2.64 эВ, однако в длинноволновой части спектра наблюдалась другая структура, характерная для объемных образцов 3C-SiC (рис. 2).

3. Проводимость в магнитном поле

На основе аналогичных гетероструктур были подготовлены образцы для холловских измерений, имеющие форму прямоугольников $2 \times 0.5 \times 0.5$ мм с шестью омическими контактами, расположенными в форме двойного холловского креста. Измерения проводились на постоянном токе в магнитном поле с индукцией до 1.2 Т.

Исследование двумерного характера движения носителей в исследованных структурах проводилось путем измерения анизотропии проводимости в магнитных полях, перпендикулярных (H_{\perp}) и параллельных (H_{\parallel}) интерфейсу. Для выяснения наличия анизотропии проводимости в магнитном поле в исследуемых структурах шток с закрепленным на нем образцом мог вращаться вокруг вертикальной оси, и таким образом изменялся угол между магнитным полем и плоскостью образца.

Малая подвижность носителей заряда, а также достаточно большое сопротивление контактов при низких температурах приводили к большим трудностям

при измерениях и не позволили точно идентифицировать экспериментальные зависимости. Однако удалось установить, что проводимость гетероструктур ($\sim 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при $T \approx 80$ К) имеет величину, приблизительно на 2 порядка большую, чем проводимость подложки 6H-SiC с теми же геометрическими размерами и уровнем легирования, но без эпитаксиального слоя $p^-\text{-}3\text{C-SiC}$. Это дает основания предположить существование двумерного проводящего слоя на гетерогранице, но, возможно, не на всей площади гетероструктуры.

4. Обсуждение

Отсутствие обнаруженного в образцах $p^-\text{-}3\text{C-SiC}/n^+\text{-}6\text{H-SiC}$ спектра ФЛ в структурах без модулированного легирования показывает, что данная ФЛ связана с наличием треугольной квантовой ямы на гетерогранице $3\text{C-SiC}/6\text{H-SiC}$. При отсутствии квантовой ямы на гетерогранице излучательная рекомбинация идет в соответствии с обычными механизмами, свойственными гексагональному и кубическому политипам карбида кремния. В то же время наблюдавшийся в настоящей работе спектр ФЛ находится в другой области энергий, чем спектр ЭЛ гетеродиодов, сформированных на основе аналогичной гетероструктуры.

Для объяснения природы наблюдавшегося спектра ФЛ рассмотрим зонную схему гетероструктуры. Широкозонный полупроводник n -типа имеет высокий уровень легирования, а узкозонный является слабо легированным полупроводником p -типа. На гетерогранице образуется потенциальная яма для электронов, дно которой располагается ниже уровня Ферми. Это приводит к переходу электронов из широкозонного полупроводника в потенциальную яму с образованием двумерного электронного газа (2DEG) (рис. 3). При возбуждении фотолюминесценции в образце создаются электронно-дырочные пары. При этом, вследствие имеющегося в области гетерограницы изгиба зон, фотовозбужденные дырки отходят от границы в глубь узкозонного материала. Соответственно

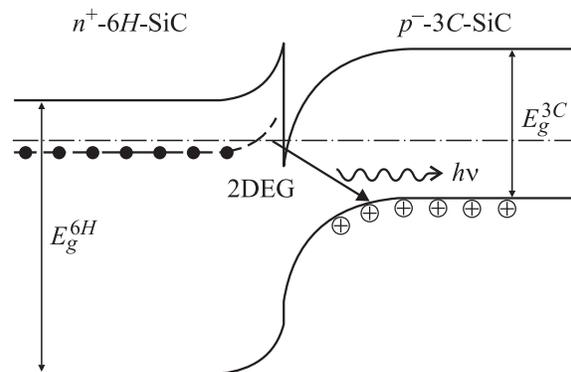


Рис. 3. Энергетическая диаграмма и схема излучательных переходов в исследованной гетероструктуре $p^-\text{-}3\text{C-SiC}/n^+\text{-}6\text{H-SiC}$.

при излучательной рекомбинации переход оказывается непрямым в реальном пространстве, и энергия такого перехода может быть на величину изгиба зон меньше ширины запрещенной зоны узкозонного материала (плюс энергия размерного квантования в яме для электронов). Подобный механизм рекомбинации был ранее предложен для гетероструктур $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [10]. То, что в спектре ЭЛ гетеродиодов, сформированных на основе аналогичной гетероструктуры, наблюдалось смещение линии свободного экситона в 3С-SiC коротковолновую область, по-видимому, связано с уменьшением изгиба зон приложенным напряжением, а также большей концентрацией носителей (инжекция) вблизи гетерограницы.

5. Заключение

Проведенные исследования показали влияние гетероперехода как на спектр ФЛ, так и на величину сопротивления. Однако специфика материала SiC (сложность получения высокопроводящих контактов при низких температурах), а также недостаточное структурное совершенство эпитаксиальных структур (отсутствие сильно легированного спейсера, возможность образования гетероперехода не по всей площади структуры — как предполагалось в [8]) не позволили пока получить эффекты „классические“ для структур с двумерным газом. Следует ожидать, что усложнение техники эксперимента (например, приложение внешнего поля при измерении спектров ФЛ), а также оптимизация ростовых и послеростовых технологий SiC позволят это сделать в ближайшем будущем.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 03-02-160546 и 04-02-01-6632а.

Список литературы

- [1] 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**, 419 (2001).
- [2] A. Fissel, U. Kaiser, B. Schroter, W. Richter, F. Bechstedt. *Appl. Surf. Sci.*, **184**, 37 (2001).
- [3] R.S. Okojie, M. Xhang, P. Pirouz, S. Tumakha, G. Jessen, L. Brillson. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3056 (2001).
- [4] А.А. Лебедев, Г.Н. Мосина, И.П. Никитина, Н.С. Савкина, Л.М. Сорокин, А.С. Трегулова. *Письма ЖТФ*, **27**, 57 (2001).
- [5] А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, Н.С. Савкина, Е.В. Богданова, А.С. Трегулова, А.Н. Кузнецов, Л.М. Сорокин. *Письма ЖТФ*, **28**, 78 (2002).
- [6] A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, N.S. Savkina, E.V. Bogdanova, A.S. Tregubova, A.N. Kuznetsov. *Mater. Sci. Forum.*, **433–466**, 169 (2003).
- [7] S. Juillaquet, J. Camassel. *Mater. Sci. Forum.*, **483–485**, 335 (2004).
- [8] A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, N.S. Savkina, A.N. Kuznetsov. *Mater. Sci. Forum.*, **457–460**, 597 (2004).
- [9] С.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев, О.В. Посредник. *ФТП*, **39** (2005).
- [10] J.P. Bergman, Q.X. Zhao, P.O. Holtz, B. Monemar, M. Sundaram, J.P. Merz, A.C. Gossard. *Phys. Rev. B*, **43**, 4771 (1991).

Редактор Л.В. Беляков

Properties of 2-D electron gas in p^- -3C-SiC/ n^+ -6H-SiC heterostructures at low temperatures

A.A. Lebedev, D.K. Nel'son, B.S. Razbirin, I.I. Saidashev, A.N. Kuznetsov, A.E. Cherenkov

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