

# Отрицательная дифференциальная проводимость и блоховские осцилляции в естественной сверхрешетке политипа $8H$ карбида кремния

© В.И. Санкин, А.А. Лепнева

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

(Получена 13 января 2000 г. Принята к печати 14 января 2000 г.)

Исследованы особенности электронного транспорта в сильных электрических полях в гексагональном политипе  $8H$ -SiC, обусловленные наличием естественной сверхрешетки в структуре кристалла и связанные с периодическим потенциалом минизон в электронном спектре. Показано, что в этом политипе, как и в ранее исследованных политипах  $6H$ - и  $4H$ -SiC, наблюдается отрицательная дифференциальная проводимость, обусловленная эффектом блоховских осцилляций.

## Введение

Карбид кремния (SiC), как известно, представляет интерес прежде всего благодаря таким физическим и химическим свойствам, как твердость, химическая стойкость в агрессивных средах, сохранение полупроводниковых характеристик при высоких температурах вплоть до  $1000^\circ\text{C}$ , высокая теплопроводность, большие пробойные поля и многим другим. Наибольший интерес, однако, вызывает существование политипов в виде различных кристаллов SiC с большими и очень большими размерами элементарной ячейки, или так называемых сверхструктур. Практически во всех политипах кроме основной периодичности, соответствующей постоянной решетки, можно выделить дополнительную с периодом в несколько единиц и даже несколько десятков постоянных решетки. Такая сверхпериодичность получила название естественной сверхрешетки (СР). Кроме вопроса о природе сверхструктур, огромный интерес вызывает вопрос о том, какое влияние сверхпериодичность оказывает на электронные свойства кристаллов. Безусловно, эта проблема является фундаментальной, но несомненно и то, что результаты такого исследования представляют большой практический интерес, поскольку речь идет о свойствах кристаллов SiC, практическая ценность которых не вызывает сомнений.

Интерес к системам с кристаллической сверхпериодичностью возник в середине 60-х годов после опубликования Л.В. Келдышем работы [1], в которой предлагалась идея создания с помощью акустической волны сверхпериодичности в кристалле, что должно приводить к расщеплению непрерывной и широкой зоны в последовательность узких зон, или минизон. Приложение сильного электрического поля  $F$  к такой системе предполагает возникновение режима брэгговского отражения электронов [2] и, как следствие, возникновение отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). Принципиальная возможность получения ОДП, связанной с индуцированной полем локализацией, на искусственной СР была

показана в [3]. Пороговое поле ее возникновения  $F_t$  определяется как

$$eF_t d > \hbar/\tau \quad (1)$$

— критерий Есаки–Тсу,

$$eF_t d > 2\pi\hbar/\tau \quad (2)$$

— критерий блоховских осцилляций.

Здесь  $\hbar$  и  $\tau$  — соответственно постоянная Планка и время рассеяния электронов,  $d$  — период СР. Критерии (1) и (2) означают, что ОДП, связанная с этими эффектами, возникает тогда, когда частота осцилляций  $eF_t d/\hbar$  или  $eF_t d/2\pi\hbar$  превышает частоту рассеяния.

В эффектах, рассмотренных выше, [3] штарковская энергия  $eFd$  еще настолько мала, что квазинепрерывность первой минизоны сохраняется, т.е. на ее ширине укладывается много штарковских уровней.

Можно утверждать, что эта идея стимулировала создание искусственных СР на основе последовательности гетеропереходов, которые и по сей день являются объектами многочисленных исследований. Однако главной задачей этих работ являлось и является обнаружение ОДП, что, к сожалению, на сегодняшний день практически не удалось осуществить. Естественно, что эта же задача является центральной при исследовании транспортных свойств естественных СР в политипах SiC в сильных электрических полях. В данном случае речь пойдет о таких явлениях, как брэгговское отражение, блоховские осцилляции и других, именуемых ванье-штарковской локализацией. Результаты указанного исследования наряду с очевидными фундаментальными аспектами, касающимися проблемы ванье-штарковской локализации в целом, позволили бы существенно увеличить определенность в вопросе о влиянии естественной СР на электронные свойства SiC, а именно причинно-следственной связи периодического потенциала и минизон в электронном спектре. Исследование проблемы электронного транспорта в сильных электрических полях в системе СР политипов карбида кремния берет свое начало с изучения этого вопроса в политипе  $6H$ -SiC. В серии работ [4–10] было показано, что в электронном транспорте в сильном

поле наблюдался ряд эффектов, которые интерпретировались как эффекты ванье-штарковской локализации. Действительно, впервые в результате прямого наблюдения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в статическом режиме была обнаружена ОДП при критическом поле, превышающем 100 кВ/см. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что данный эффект является результатом возникновения режима блоховских осцилляций в естественной СР политипа 6H-SiC. В области существенно более сильных полей, когда штарковская энергия становится сравнимой с шириной первой минизоны, в естественной СР этого же политипа наблюдались такие эффекты, как штарк-фононные резонансы (500–1400 кВ/см), полная локализация первой минизоны ( $\sim 1600$  кВ/см), межминизонное резонансное туннелирование (1950 кВ/см) и другие, свидетельствующие о развитии процесса ванье-штарковской локализации. Это позволило оценить наиболее важные параметры минизонного электронного спектра в 6H-SiC (ширина первой минизоны  $E_1 = 256$  мэВ, зазор между первой и второй минизонами  $E_{1,2} = 180-190$  мэВ), которые составили основу для оценок аналогичных параметров в других политипах, если в них подобные данные не получены или их получение невозможно в принципе. К числу последних относится политип 4H-SiC, в котором наблюдались эффекты ОДП, связанные с блоховскими осцилляциями и штарк-фононными резонансами, но невозможны другие эффекты, для которых критические поля превышают собственные пробойные поля вследствие большой величины ширины первой минизоны и межминизонного зазора [11–13]. Исследование политипов гексагонального ряда позволяет проводить и анализировать корреляции между параметрами естественной СР и столь важными величинами, как характеристики минизонного спектра и значения критических полей для различных эффектов ванье-штарковской локализации. Такое сравнительное исследование дает весьма ценный набор данных для разработки теории ванье-штарковской локализации, является часто наиболее убедительным аргументом при интерпретации экспериментальных данных, а также позволяет произвести выбор оптимального политипа для последующих прикладных разработок. Поэтому в данной работе представлены результаты исследований ванье-штарковской локализации в гексагональном политипе 8H-SiC.

## Особенности эксперимента

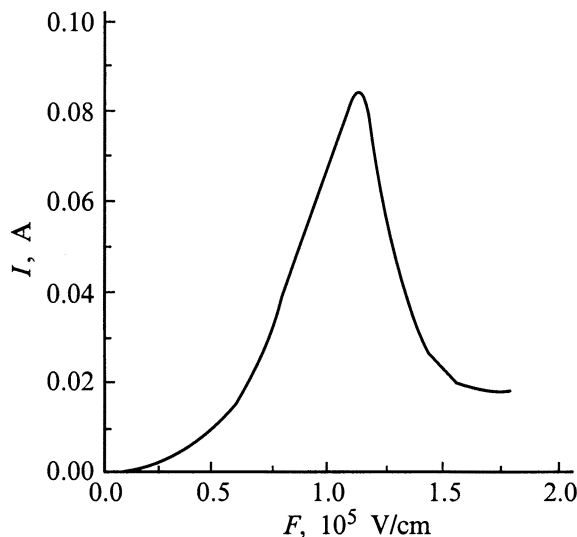
Для проведения эксперимента создавались триодные биполярные структуры  $N^+-\pi-N^+$ , аналогичные тем, которые использовались в предыдущих исследованиях на политипах 4H-SiC и 6H-SiC [4]. Основные функции структуры обеспечиваются свойствами ее центральной  $\pi$ -области, легированной, вопреки стандартным требованиям, глубокой акцепторной примесью — скандием. Благодаря инерционности процессов перезарядки с участием

атомов скандия и ничтожной концентрации свободных дырок импульсное поле микросекундной длительности практически не экранирует на расстояниях в несколько десятков мкм, что оказывается достаточным для создания в  $\pi$ -области, размером в несколько мкм, однородного электрического поля. Благодаря выбору скандия в качестве легирующей примеси обеспечивается работа триодной структуры при комнатной температуре. В целом данная структура позволяет получить: 1) однородность электрического поля в рабочей  $\pi$ -области; 2) исключительно электронный ток в рабочей области; 3) параллельность электрического поля оси естественной СР; 4) дрейфовый режим протекания тока; 5) управление рабочим током независимо от поля в рабочей области. Следует добавить, что все это обеспечивается при работе триодной структуры в импульсном режиме, и энергетические параметры скандия позволили использовать достаточно удобный диапазон микросекундных импульсов. Подчеркнем, что наиболее серьезной проблемой, которую приходится решать при создании  $N^+-\pi-N^+$ -структур, является формирование эпитаксиального  $\pi$ -слоя со структурой, идентичной политипу подложки. Легирование скандием в процессе эпитаксиального роста стимулирует преимущественный рост политипа 4H-SiC, и поэтому каждый раз при росте нового политипа (не 4H-SiC) приходится искать новые условия эпитаксиального роста, которые обеспечили бы воспроизводимый рост. Это в большей степени определяется вариацией необходимого диапазона температур эпитаксиального роста, чем другими факторами. Таким способом удалось преодолеть механизм преимущественного роста 4H-SiC и обеспечить воспроизводимый рост нескольких политипов, таких как 6H-, 8H-, 21R- и 15R-SiC.

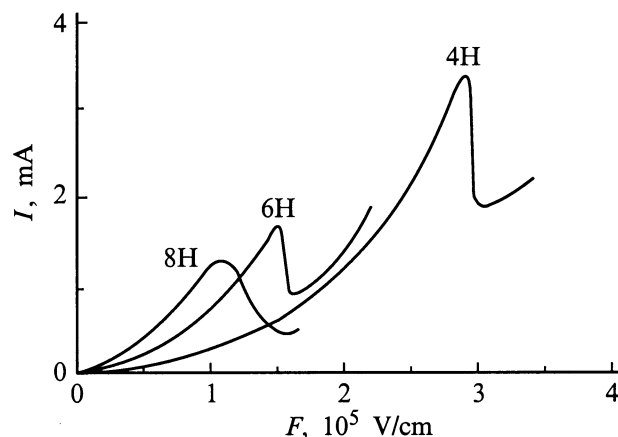
## Экспериментальные данные и их обсуждение

ВАХ триодной структуры на основе 8H-SiC показана на рис. 1. Монотонный рост тока  $I$  прерывается при достижении величины поля  $F \approx 110$  кВ/см, после чего наблюдается достаточно протяженный участок падения тока и, следовательно, ОДП.

Полученные в результате измерений  $N$ -образные ВАХ для политипов 4H-, 6H- и 8H-SiC в сравнении представлены на рис. 2. Пороговые поля начала падающих участков ВАХ, т.е. возникновения ОДП, составили в среднем для разных образцов следующие значения:  $F_i \approx 1.1 \cdot 10^5$  В/см для 8H-SiC,  $1.5 \cdot 10^5$  В/см для 6H-SiC и  $2.9 \cdot 10^5$  В/см для 4H-SiC. Величина  $F_i$  определялась с погрешностью около 10%, связанной в первую очередь с неточностью определения ширины базового слоя. Такое изменение пороговых полей для последовательности 4H-, 6H-, 8H-SiC коррелирует с изменением периода естественной СР в этих политипах: 5, 7.5 и 10 Å. Согласно критериям ванье-штарковской локализации (1) и (2) значение критического поля обратно пропорционально



**Рис. 1.** Вольт-амперная характеристика трехэлектродной структуры на основе естественной СР политипа 8H-SiC.



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика трехэлектродных структур на основе естественных СР политипов 4H-, 6H-, 8H-SiC.

периоду естественной СР при постоянном значении времени рассеяния. Из рис. 2 видно, что полученные ВАХ качественно близки, однако пороговые поля существенно различаются. Заметим, что на рис. 2 представлены структуры, на которых  $N$ -образная ВАХ проявилась наиболее отчетливо. В ряде образцов падение тока не превышало 20%, кроме того во многих случаях наблюдению эффекта препятствовали неконтролируемые утечки тока и микроплазменный пробой. ВАХ 30% образцов даже при отсутствии подобных утечек сохраняла монотонность вплоть до полей пробоя [11].

Для численных оценок по выражениям (1) и (2) требуется значение времени рассеяния  $\tau$ , которое можно оценить по формуле  $\tau = m^* \mu / e$ . Но при этом эффективную массу  $m^*$  и подвижность  $\mu$  нужно определять при больших полях, близких к пороговым. Для таких оценок

были использованы результаты измерений насыщенной скорости дрейфа электронов  $v_s$  для поля, направленного параллельно оси естественной СР [14]. Значения электрического поля  $F_s$ , при которых происходило насыщение дрейфовой скорости составили 135, 140, 155 кВ/см, сами значения насыщенной дрейфовой скорости  $v_s$  —  $1.0 \cdot 10^6$ ,  $2.0 \cdot 10^6$  и  $3.3 \cdot 10^6$  см/с для 8H-, 6H- и 4H-SiC соответственно. Отсюда  $\mu$  и  $m^*$  определялись по формулам

$$\mu = v_s / F_s, \quad (3)$$

$$m^* = 8E_p / 3\pi v_s^2, \quad (4)$$

где  $E_p = 106$  мэВ — усредненная энергия оптического фона [15]. Время рассеяния оказалось равным  $\tau = 1.6 \cdot 10^{-13}$ ,  $3 \cdot 10^{-13}$  и  $5.9 \cdot 10^{-13}$  с для 4H-, 6H- и 8H-SiC соответственно. Пороговые поля по критерию (1) составили 80, 27 и 10.6 кВ/см для 4H-, 6H- и 8H-SiC соответственно, что существенно меньше приведенных выше экспериментальных значений 290, 150 и 110 кВ/см. Пороговые поля, оцененные по критерию (2), составили 500, 170 и 65 кВ/см, что существенно ближе к экспериментальным значениям, а учитывая 30%-ую погрешность в определении  $v_s$ , можно считать степень совпадения достаточно высокой. Поэтому наблюдаемые эффекты скорее коррелируют с режимом блоховских осцилляций, чем с режимом Есаки–Тсу. Согласно [3], дрейфовая скорость в режиме минизонного транспорта есть

$$v_d = A(F/B) \{ 1 / [1 + (F/B)^2] \}, \quad (5)$$

где  $A = dE_1 / 2\hbar$ ,  $B = \hbar / ed\tau$ . Для 6H-SiC ширина первой минизоны составляет  $E_1 = 256$  мэВ. Полученное из (5) время рассеяния  $\tau = 5 \cdot 10^{-13}$  с согласуется с вышеприведенными данными.

По-видимому, наблюдаемую ОДП можно объяснить и другими причинами. Известно, что  $N$ -образная ВАХ возникает также и при рекомбинационной неустойчивости, когда носители тока захватываются на отталкивающие центры [16]. Однако времена пролета электронов через базовый слой  $t \approx 10^{-10}$  с существенно меньше времени рекомбинации, что делает вероятность этого процесса ничтожной. Кроме того, можно с большой уверенностью утверждать, что в случае всяких иных механизмов, в том числе и механизма рекомбинационной неустойчивости, пороговые поля для политипов 4H-, 6H- и 8H-SiC были бы практически одинаковыми.

Таким образом, представляется обоснованной интерпретация наблюдаемых эффектов в рамках теории ваньештарковской локализации. Параметры эффектов удовлетворяют критериям ваньештарковской локализации, а различие пороговых полей для трех рассмотренных политипов соответствует различию параметров их сверхрешеток. Возрастающая ветвь ВАХ справа от пороговой точки может быть объяснена ростом инжекции при увеличении поля, а также поперечным разогревом электронов. Кроме того, не все электроны, участвующие в

протекании тока, подвержены ванье-штарковскому квантованию. В силу геометрии экспериментальной структуры протекание тока в ней возможно и в направлениях, не параллельных оси естественной СР. Подчеркнем, что наблюдаемая для этих политипов ОДП в режиме блоховских осцилляций рассматривается нами как начальная фаза процесса ванье-штарковской локализации.

Данная работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-02-18295) и программы МНТП "Физика твердотельных наноструктур" (проект 97-1038).

## Список литературы

- [1] Л.В. Келдыш. ФТТ, **4**, 2265 (1962).
- [2] G.N. Wannier. Phys. Rev., **11**, 432 (1960).
- [3] L. Esaky, R. Tsu. IBM J. Res. Dev., **14**, 61 (1970).
- [4] В.И. Санкин, А.В. Наумов. Письма ЖТФ, **16** (7), 91 (1990).
- [5] V.I. Sankin, A.V. Naumov. Springer Proc. Phys., **43**, 221 (1991).
- [6] V.I. Sankin, A.V. Naumov. Superlatt. Microstr., **10**, 353 (1991).
- [7] В.И. Санкин, И.А. Столичнов. Письма ЖЭТФ, **59**, 703 (1994).
- [8] V.I. Sankin, I.A. Stolichnov. Proc. Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology" (St. Petersburg, 1994) p. 87.
- [9] V.I. Sankin. Superlatt. Microstr., **18** (4), 309 (1996).
- [10] В.И. Санкин, И.А. Столичнов. Письма ЖЭТФ, **64**, 105 (1996).
- [11] В.И. Санкин, А.В. Наумов, И.А. Столичнов. Письма ЖТФ, **17** (23), 38 (1991).
- [12] V.I. Sankin. Inst. Phys. Conf., **142**, 2.401 (1996).
- [13] В.И. Санкин, И.А. Столичнов, А.А. Мальцев. Письма ЖТФ, **22** (24), 29 (1996).
- [14] В.И. Санкин, А.А. Лепнева. ФТП, **33**, 586 (1999).
- [15] В.И. Санкин. ФТТ, **17**, 1820 (1975).
- [16] А.Ф. Волков, Ш.М. Коган. УФН, **96**, 633 (1968).

Редактор Л.В. Шаронова

## Negative differential conduction and the Bloch oscillations in the natural superlattice of 8H silicon carbide

V.I. Sankin, A.A. Lepneva

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

**Abstract** In this paper the results of the strong electric field electron transport investigations for hexagonal 8H-SiC polytype are presented, which demonstrate that the negative differential conduction, caused by the Bloch oscillations in a natural superlattice, is peculiar to this polytype as well as to 6H- and 4H-SiC one.