

# Электронный транспорт в естественной сверхрешетке карбида кремния в режиме квантования Ванье–Штарка: фундаментальные и прикладные аспекты

© В.И. Санкин<sup>¶</sup>, П.П. Шкробий

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

(Получена 15 ноября 2000 г. Принята к печати 16 ноября 2000 г.)

Исследование транспорта горячих электронов в естественной сверхрешетке карбида кремния позволило впервые получить практически все ранее предсказанные теоретически эффекты ванье–штарковской локализации: блоховские осцилляции, штарк-фононные резонансы, локализацию минизоны, резонансное межминизонное туннелирование. В структурах  $n^+ - n^- - n^+$ , оптимизированных для сверхвысокочастотных измерений, в области электрических полей, соответствующих режиму блоховских осцилляций, наблюдался эффект подвижного электрического домена, что позволило с большой степенью вероятности прогнозировать наличие в естественной сверхрешетке  $6H$ -SiC колебаний сверхвысокочастотного диапазона.

## 1. Введение

Карбид кремния широко известен как материал для мощной высокотемпературной радиационно стойкой электроники. В настоящее время созданы практически все основные приборы из перечня кремниевой электроники. Однако представляется более перспективным создавать приборы на основе таких свойств карбида кремния, которые не имеют аналогов среди других полупроводников. Именно эта проблема является предметом обсуждения данной работы. С этой точки зрения наибольший интерес представляет существование политипов карбида кремния в виде различных кристаллов SiC с большими размерами элементарной ячейки. В большинстве политипов, исключая  $3C$ - и  $2H$ -SiC, кроме основной периодичности, равной постоянной решетки, можно выделить дополнительную периодичность размером в несколько и даже несколько десятков постоянных решетки. Такая сверхпериодичность получила название естественной сверхрешетки (ЕСР). Огромный интерес вызывает вопрос о влиянии ЕСР на электронные свойства политипов. Как известно, полупроводники со сверхрешеткой являются объектами, в которых исследуется индуцированная полем локализация (ИПЛ) или ванье–штарковская локализация (ВШЛ) [1]. Суть этого явления заключается в том, что, согласно квантово-механическим принципам, разогретые электрическим полем электроны, достигая верхнего края разрешенной зоны, испытывают брэгговское отражение, в результате чего двигаются против поля, теряя кинетическую энергию и опускаясь на дно зоны. После чего процесс повторяется. Из этого следует, что движение электрона приобретает характер осцилляций, носящих название блоховских осцилляций (БО). Электронный спектр при этом из квазинепрерывного превращается в дискретный. По мере увеличения поля дискретность возрастает, а

значит, электрон становится все более локализованным. Главным следствием такого нового состояния в кристалле является возникновение отрицательной дифференциальной проводимости.

Большая часть исследований ИПЛ проведена в так называемых рукотворных или искусственных сверхрешетках (ИСР), в частности на гетеропереходных ИСР GaAs–AlAs. Но полученные экспериментальные данные, особенно в части исследования квантового транспорта, нельзя признать однозначными [2,3].

В данной работе речь пойдет о транспортных явлениях в сильных электрических полях, а именно о явлениях ВШЛ в ЕСР. Такая сверхрешетка имеет ряд преимуществ перед ИСР: она свободна от флуктуаций толщины слоя и от несовершенств интерфейсов, которые негативно сказываются на реализации эффектов ВШЛ в ИСР. Возможно, что это обстоятельство явилось одной из главных причин первого экспериментального наблюдения многих эффектов ВШЛ именно в ЕСР политипов SiC [4].

Такие многообещающие эффекты, как отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП), электрофононные резонансы (ЭФР) в условиях ванье–штарковских лестниц, резонансное туннелирование (РТ) между соседними минизонами, обнаруженные при исследовании ИПЛ в ЕСР, являются предметом исследования в данной работе. Кроме того, здесь будут представлены данные, показывающие влияние ВШЛ на такие практически важные явления, как ударная ионизация и лавинный пробой.

Результаты данного исследования представляют не только принципиальный интерес, но и создают заманчивые перспективы для разнообразных с практической точки зрения разработок на естественных сверхрешетках политипов SiC. Вот некоторые из них:

1. ОДП — основа для разработки сверхвысокочастотных (СВЧ) и терагерцовых усилителей и генераторов.
2. ЭФР — источник терагерцового излучения.
3. РТ — основа для сверхбыстрых мощных и эффективных переключателей.

<sup>¶</sup> E-mail: sankin@widegap.ioffe.rssi.ru  
Fax: (812)515 6747, (812)247 1017

Для практической реализации СВЧ колебаний в ЕСР взамен биполярных триодных структур, оптимальных для статических исследований, были созданы карбид-кремниевые униполярные  $n^+ - n^- - n^+$ -диодные и вертикальные полевые триодные структуры, способные обеспечить временные требования к наблюдению быстрых процессов. Нетривиальные особенности вольт-амперных характеристик таких структур в сильных электрических полях также будут предметом обсуждения данной работы.

## 2. Биполярная триодная структура типа $n^+ - \pi - n^+$

Идея использования вместо диодных триодных структур возникла как необходимость, обусловленная отсутствием эпитаксиальных слоев SiC с низкой концентрацией примеси [4]. Такие системы позволяют управлять рабочим током, не изменяя величины электрического поля. Эта идея впоследствии использовалась и в работах с ИСР.

Для исследования электронного транспорта в режиме ВШЛ была создана оригинальная биполярная триодная структура, которая удовлетворяла следующим требованиям:

- 1) измеряемый ток в образце был чисто электронным;
  - 2) электрическое поле в образце однородно;
  - 3) током в образце можно управлять независимо от поля;
  - 4) поле в рабочей области направлено параллельно оси ЕСР в каждом исследуемом политипе, т. е.  $F \parallel C$ ;
  - 5) механизм токопротекания — инжекционно-пролетный.
- Подробно работа экспериментальной структуры описана в работе [4]. Здесь мы ограничимся только несколькими основными сведениями. Структура состоит из трех областей: эмиттера, базы и коллектора. Главный элемент структуры — база, которая содержит исследуемый политип, легированный глубоким акцептором (скандием), что обеспечивает очень низкий уровень свободных дырок  $p \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$  при 300 К. Таким образом, эта была структура типа  $n^+ - \pi - n^+$ . В базе такой структуры гарантирован дрейф электронов от эмиттера к коллектору, в условиях квазиоднородного импульсного поля. В этом режиме наблюдались эффекты в относительно небольших полях от 100 до 500 кВ/см — такие, как блоховские осцилляции, насыщенные дрейфовые скорости. Другой режим предусматривал наличие неизменного по величине и небольшого, порядка 50 кВ/см, импульсного поля в базе и переменного по величине большого поля в коллекторном переходе. При этом электроны, дрейфуя через базу, попадали в поле коллектора, где средняя величина поля изменялась от 500 до 2500 кВ/см. В данном режиме производились наблюдения электрофонных резонансов, локализации первой минизоны, межминизонного туннелирования и других эффектов.

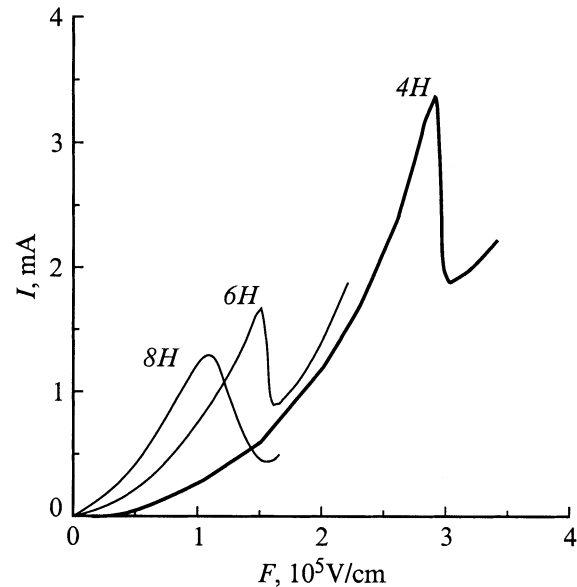


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики триодной структуры на основе 4H-, 6H- и 8H-SiC.

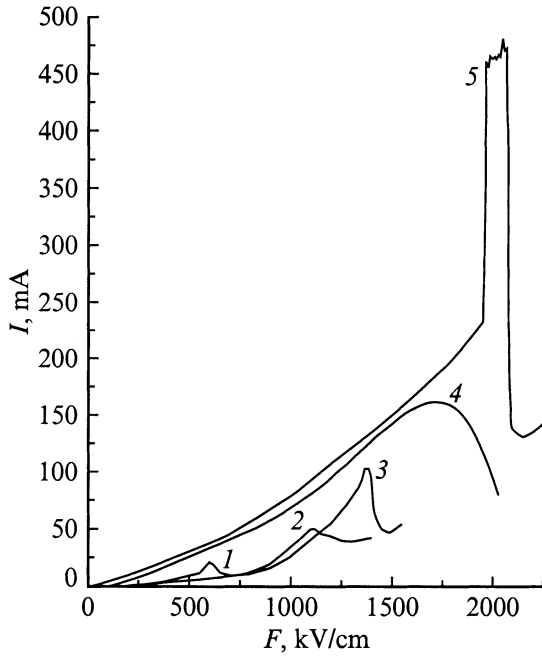
## 3. Экспериментальные результаты исследований на биполярной триодной структуре

### 3.1. Блоховские осцилляции

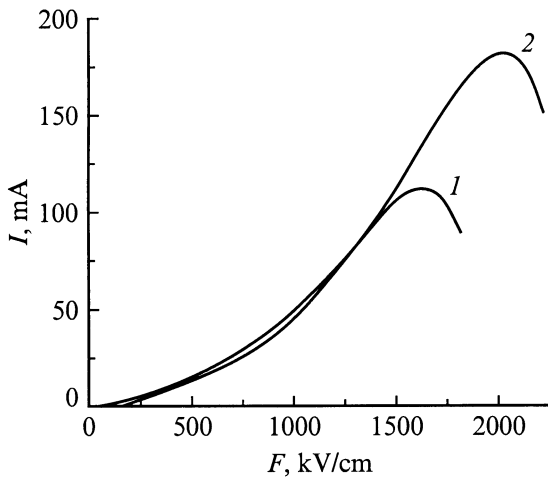
На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) трех политипов SiC: 4H, 6H и 8H. Характерной особенностью показанных ВАХ является наличие участка с ОДП. Существуют два возможных механизма возникновения такой ОДП: отражение электронов от области с отрицательной эффективной массой и отражение от края минизоны или блоховские осцилляции, с существенно различными критическими полями. Необходимые для таких оценок значения времен рассеяния при сильном поле были нами получены в результате экспериментального определения дрейфовых скоростей. Сравнение оценочных значений с соответствующими экспериментальными значениями критических полей 290, 150 и 110 кВ/см показало, что экспериментальные наблюдения с большей вероятностью соответствуют режиму блоховских осцилляций. Указанное изменение значений критических полей находится в качественном соответствии с изменением периода ЕСР в данных политипах.

### 3.2. Штарк-фононные резонансы

Когда в процессе увеличения поля область локализации электрона уменьшается до величины, существенно меньшей длины свободного пробега электрона, протекание тока становится возможным только за счет туннельно-перескокового механизма, при котором реализуются резонансные эффекты. Один из таких эффектов возможен при условии совпадения штарковской энергии



**Рис. 2.** Ванье-штарковская локализация в естественных сверхрешетках 6H-SiC: 1 — поперечный акустический фонов TA, 46 мэВ; 2 — продольный акустический фонов LA, 77 мэВ; 3 — продольный оптический фонов LO, 103 мэВ; 4 — полная локализация первой минизоны; 5 — резонансное туннелирование между первой и второй минизонами в сверхрешетке 6H-SiC.



**Рис. 3.** Штарк-фононные резонансы в сверхрешетках 4H-SiC: 1 — продольный акустический фонов LA, 77 мэВ; 2 — продольный оптический фонов LO, 103 мэВ.

с энергией фона. Заметим, что столь сильное увеличение поля достигалось в коллекторном переходе. При этом электроны, пролетая через область базы, попадали в область коллектора, где максимальное поле изменялось в пределах 600–4100 кВ/см, а среднее поле, значения которого указаны на рис. 2, было в 2 раза меньше. На

рис. 2 (кривые 1–3) и рис. 3 приведены экспериментальные данные для двух политипов SiC: 6H и 4H. Значения полей существенно различны при близких значениях фононов, что объясняется различием в 1.5 раза значений периода ЕСР.

### 3.3. Полная локализация первой минизоны

Когда штарковская энергия превысит величину, составляющую половину от ширины первой минизоны, согласно теории [5], происходит локализация минизоны и возникновение протяженной по полю области с ОДП. Такой эффект наблюдался нами в политипе 6H-SiC и показан на рис. 2 (кривая 4). Заметим, что аналогичный эффект в политипе 4H находится за область электрического пробоя и объективно не достижим. В политипе 8H, как и в некоторых других, такой эффект пока не наблюдался из-за микроплазменного пробоя, существенно понижающего поле в коллекторном переходе. Наблюдение этого эффекта позволило впервые экспериментально определить значение ширины первой минизоны 6H-SiC, которое составило  $E_1 = 256$  мэВ.

### 3.4. Межминизонное туннелирование

На рис. 2 (кривая 5) представлены данные, которые могут рассматриваться как проявление электрического пробоя, если бы не последующее за всплеском тока его резкое падение, что абсолютно не характерно для пробоя. Наблюдаемые экспериментальные факты можно объяснить следующим образом. Участок резкого нарастания электронного тока связан с резонансным туннелированием электронов из состояний дискретного спектра первой минизоны во вторую минизону, сохраняющую квазинепрерывность. Последующее падение тока может быть связано с режимом блоховских осцилляций (БО) электронов во второй минизоне. Исходя из простейшего закона увеличения ширины первой минизоны с ростом ее номера можно считать, что вторая минизона примерно в 4 раза шире первой и при имеющихся полях квазинепрерывность в ней еще не нарушается. Поэтому в ней может реализоваться механизм БО электронов. Известно, что межминизонное резонансное туннелирование становится возможным, когда штарковская энергия совпадает с энергией межминизонного зазора  $E_{12}$ .

Представляется корректным характеризовать процесс резонансного туннелирования не средним, а максимальным полем в области объемного заряда. Следовательно, штарковская энергия, соответствующая межминизонному туннелированию, составляет около 303 мэВ, что равняется сумме  $E_1/2 + E_{12}$ , откуда  $E_{12} \approx 175$  мэВ. При этом сумма значений  $E_1 + E_{12} + E_2 \approx 1.46$  эВ, что находится в хорошем соответствии со спектральным положением межминизонной полосы поглощения, обусловленной переходами между первой и второй минизонами [6].

### 3.5. О механизме электронной ударной ионизации

Ранне было установлено, что электронный компонент ударной ионизации для  $F \parallel C$  существенно подавлен [7]. Рядом экспериментов удалось показать, что этот эффект сугубо ориентационный и связан с присутствием ЕСР. Однако, как удалось показать в [8], разогрев электронов возникает в аномально больших полях, в 2 раза превышающих ожидаемые из теории пробойные поля. Если вопрос о подавлении электронного разогрева в узкой зоне практически ясен, то механизм инициации электронного разогрева в системе минизонного спектра оставался неясным. На основании полученных данных можно сказать, что электрон в результате туннелирования в вышележащую минизону (рис. 2, кривая 5) становится квазисвободным, и его разогрев происходит по классическому механизму.

## 4. Исследования блоховских осцилляций в $6H$ -SiC диодных $n^+ - n^- - n^+$ -структурах

Описанная в разд. 2, 3 специальная структура, сформированная как биполярный транзистор, со специфически устроенной базой, к сожалению, по своим временным свойствам не пригодна для использования в СВЧ диапазоне. Для этих задач были разработаны униполярные структуры диодного типа  $n^+ - n^- - n^+$ , что стало возможным после недавних достижений по росту эпитаксиальных слоев с низким содержанием донорной примеси. База таких структур типа  $n^-$  имеет электронную проводимость с концентрацией  $N_d - N_a$  от  $2 \cdot 10^{15}$  до  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а две  $n^+$ -области — сильно легированные контактные слои с концентрацией  $N_d - N_a$  от  $3 \cdot 10^{18}$  до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Структура формировалась в виде мезы с поперечным размером 25–40 мкм, при толщине базы 3–5 мкм. ВАХ такой структуры показана на рис. 4. Поведение структуры до некоторого напряжения не имеет особенностей

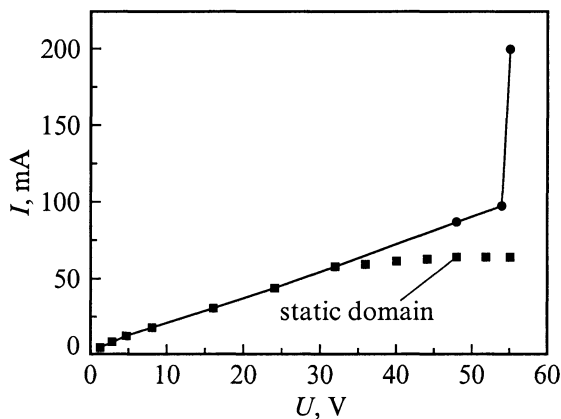


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика  $6H$ -SiC  $n^+ - n^- - n^+$  диодной структуры с естественной сверхрешеткой.

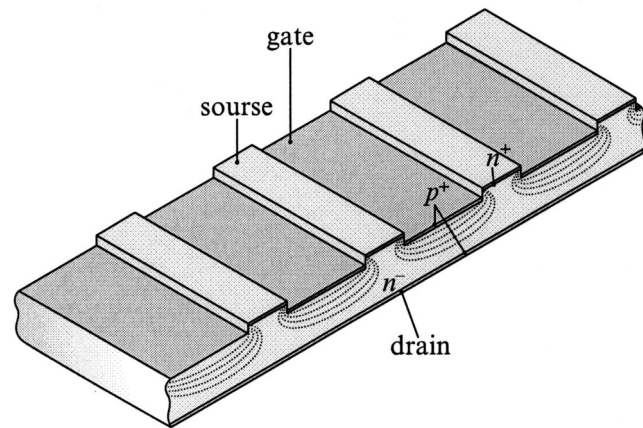


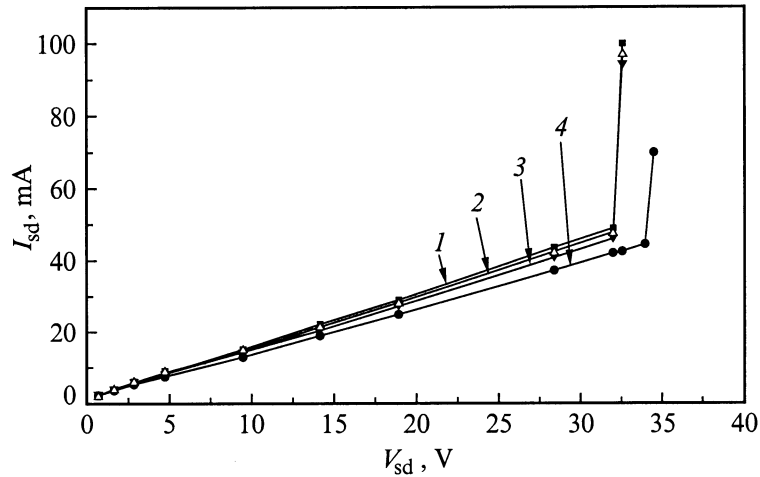
Рис. 5. Схематический вид транзистора со статической индукцией с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора.

и обнаруживает ход, близкий к линейному. Интерес вызывает резкий рост тока при определенном значении напряжения  $U$  на структуре, который сопровождается излучением света. Спектр этого излучения совпадает со спектром излучения при пробое  $p$ - $n$ -переходов. Добавим, что величина однородного поля в этом случае не превышает  $150 \text{ кВ/см}$ , что более чем на порядок меньше самых малых среди известных значений пробойного поля в  $6H$ -SiC. Вероятно, такой дефицит поля может быть преодолен за счет доменизации поля в области базы. Образование домена поля, как известно, возможно при возникновении в кристалле ОДП. Согласно вышесказанному, при таких полях  $150 \text{ кВ/см}$  в  $6H$ -SiC была обнаружена ОДП, вызванная режимом блоховских осцилляций.

Если это домен, то какой: статический или подвижный? ВАХ на рис. 4 говорит в пользу последнего. В случае статического домена ВАХ обнаруживала бы пологий участок, показанный на рис. 4.

## 5. Исследование блоховских осцилляций в $6H$ -SiC триодных $n^+ - n^- - n^+$ -структурах

Для получения более убедительных доказательств вышесказанного предположения о доменизации электрического поля был проведен дополнительный эксперимент. Для этого на основе  $n^+ - n^- - n^+$ -структуры по специальной технологии была впервые реализована карбидкремниевая униполярная триодная структура в виде транзистора со статической индукцией (СИТ) с  $p$ - $n$ -переходом в качестве затвора. Схематически такой СИТ показан на рис. 5. Токотводящий канал с геометрическими размерами  $40 \times 2 \times 3 \text{ мкм}$ , который по своей структуре аналогичен вышерассмотренной структуре диодного типа  $n^+ - n^- - n^+$ , с двух сторон охвачен полем  $p$ - $n$ -переходов. Причем направление поля имеет явную составляющую поперек направления тока в канале от стока к истоку. Опыты показали, что ВАХ таких каналов



**Рис. 6.** Вольт-амперные характеристики униполярной вертикальной триодной структуры (транзистора со статической индукцией). Напряжение на затворе  $V_g$ , В: 1 — 0, 2 — (-1), 3 — (-2), 4 — (-3).

(рис. 6) при напряжении на затворе  $V_g = 0$  подобна ВАХ диодной структуры (рис. 4). Поведение ВАХ на линейном и пробойном участках при действии напряжения на затворе  $V_g$  радикально отличаются. На линейном участке наблюдается обычная реакция, характерная для СИТ: ток падает с увеличением поля на затворе с крутизной  $S = 2\text{--}4\text{ мА/В}$ , что соответствует параметрам канала. Но на участке пробоя при определенном поле на затворе ток падает с крутизной  $S = 40\text{--}60\text{ мА/В}$  (рис. 6). При реализации геометрии СИТ с параметрами, аналогичными кремниевым СИТ, указанные значения крутизны увеличиваются примерно в 50 раз. Такой гигантский и резкий эффект падения тока можно объяснить разрушением домена электрическим полем, направленным поперек полю домена. Естественно, вслед за разрушением домена происходит подавление пробоя и резкое падение тока. Этот экспериментальный факт является также аргументом в пользу подвижного домена, поскольку, согласно геометрии СИТ (рис. 5), поле затвора действует в той области канала, которая отстоит от истока примерно на 1 мкм и не может воздействовать на статический домен, локализованный вблизи истока.

К сожалению, этот режим практически неудобен для детального наблюдения генерации СВЧ сигнала, поскольку не удастся стабилизировать сквозной ток, и структура быстро деградирует. Но, с другой стороны, получен новый эффект, перспективы которого в прикладном плане, возможно, не менее привлекательны, чем генерация СВЧ сигнала. Эффект резкого падения тока с большой амплитудой — основа мощных приборов с быстрым переключением. К сожалению, деградация структуры и в этом случае является препятствием для быстрой практической реализации эффекта. Однако эта ситуация не представляется бесперспективной и по существу скорее всего обусловлена неоднородностью карбидкремниевых  $n^-$ -слоя. Как обычно, эта материаловедческая проблема решается направленными исследованиями по

улучшению качества материала. Но возможно, что это негативное явление — специфика материала, выращенного в условиях конкретной технологической установки. В этом случае можно прибегнуть к использованию материала иного изготовления. По-видимому, эта задача не выглядит очень сложной, учитывая расширяющийся круг проводимых исследований в области технологии карбида кремния.

## 6. Заключение

В данной работе были получены результаты, указывающие на определяющее влияние естественной сверхрешетки политипов карбида кремния на процесс электронного транспорта в сильных электрических полях. Это влияние выражается в виде серии эффектов, которые являются первыми серьезными доказательствами существования ванье-штарковской локализации в кристаллах. Заметим, что в искусственных сверхрешетках этого до сих пор не наблюдалось. Кроме того, представленные результаты являются основной для очень интересных и перспективных практических разработок карбидкремниевых приборов, что подтверждается обнаружением доменизации электрического поля в режиме, близком к возникновению отрицательной дифференциальной проводимости, обусловленной блоховскими осцилляциями, и разрушения электрического домена, которое сопровождается эффектом резкого переключения тока. При этом домен, согласно полученным данным, является подвижным, что с большой долей вероятности свидетельствует о возникновении СВЧ колебаний в кристалле. Их прямое обнаружение — предмет предстоящих исследований. Наблюдение эффекта разрушения электрического домена, которое сопровождается эффектом резкого переключения тока, также создает привлекательную перспективу для практических разработок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 00-02-16943), а также программы МНТП "Физика твердотельных наноструктур" (проект 97-1038).

## Список литературы

- [1] G.N. Wannier. Phys. Rev., **11**, 432 (1960).
- [2] A. Sibille, J.F. Palmier, H. Wong et al. Phys. Rev. Lett., **64**, 52 (1990).
- [3] F. Bettram, F. Capasso, D.L. Sivco et al. Phys. Rev. Lett., **64**, 3167 (1990).
- [4] В.И. Санкин, И.А. Столичнов. ФТП, **31**, 577 (1997).
- [5] R. Tsu, G. Dohler. Phys. Rev. B, **12**, 680 (1975).
- [6] G.B. Dubrovskii, A.A. Lepneva, E.I. Radovanova. Phys. St. Sol. (b), **57**, 423 (1973).
- [7] А.П. Дмитриев, А.О. Константинов, Д.П. Литвин, В.И. Санкин. ФТП, **17**, 1093 (1983).
- [8] В.И. Санкин, Ю.А. Водаков, Д.П. Литвин, ФТП, **18**, 2146 (1984).

*Редактор Т.А. Полянская*

## Electron transport in a natural silicon carbide superlattice in the Wannier–Stark quantization regime: fundamental and applied aspects

V.I. Sankin, P.P. Shkrebiy

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

**Abstract** The investigation of strong field electron transport in SiC polytype natural superlattice makes it possible for the first time to obtain all basic effects of the Wannier–Stark quantization earlier predicted theoretically: the Bloch oscillations, the Stark-phonon resonance, mini-zone localization, intermini-zone resonance tunneling. In the  $n^+ - n^- - n^+$  structures, adapted to ultra high frequency (UHF) measurements, an effect of the movable electrical domain has been observed. It allowed with high probability to suppose that UHF oscillations are present in 6H-SiC natural superlattice.