

Эффекты ванье-штарковской локализации в $6H$ -SiC планарном полевом транзисторе с p - n -переходом в качестве затвора

© В.И. Санкин[¶], П.П. Шкробий, А.А. Лебедев

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

(Получена 13 февраля 2006 г. Принята к печати 27 февраля 2006 г.)

Исследовалась зависимость фототока короткого замыкания от напряжения V_g на затворе $6H$ -SiC полевого планарного транзистора. При определенном значении V_g возникала отрицательная дифференциальная фотопроводимость, которая по своим параметрам соответствовала режиму ванье-штарковских лестниц в естественной сверхрешетке $6H$ -SiC. При этом же значении V_g происходило достаточно резкое падение к нулю тока сток-исток I_{sd} , что означало отсечку при напряжении, существенно меньшем ожидаемого напряжения отсечки для этой структуры. Эффект объясняется падением подвижности в режиме ванье-штарковских лестниц, уменьшением скорости ионизации донорных атомов и ослаблением экранирования поля.

PACS: 85.30.Tv, 71.70.Ej, 73.40.Lq

1. Введение

Хорошо известно, что электронный спектр полупроводников со сверхрешеткой состоит из узких зон, или мини-зон. Явление ванье-штарковской локализации (ВШЛ) реализуется в мини-зонном спектре, потому что сужение зоны до 100–200 мэВ снижает пороговое электрическое поле процессов ВШЛ на порядок и более, доводя его до значений в 10–100 кВ/см вместо нескольких тысяч кВ/см в обычных полупроводниках. Наиболее мощным стимулом к созданию искусственных сверхрешеток являлась возможность генерации микроволнового излучения благодаря эффекту отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) в режиме блоховских осцилляций и терагерцового излучения собственно блоховских осцилляций.

Поли типы карбида кремния (SiC), за исключением двух политипов $3C$ и $2H$, — полупроводники с естественной сверхрешеткой (ЕСР), которая определяет множество физических явлений в кристаллах политипов SiC, в первую очередь электронный транспорт в сильных электрических полях, в котором проявляются эффекты ванье-штарковской локализации [1] при совпадении направлений поля и оси естественной сверхрешетки C . Таким образом, ЕСР есть неотъемлемое свойство большинства политипов карбида кремния. Конечно, прежде всего оно представляет огромный интерес в плане возможности электромагнитной генерации. Но ВШЛ имеет многообразные проявления в оптических и, безусловно, в электрических эффектах. В целом ряде карбидокремниевых приборных структур указанные эффекты оказывают существенное влияние на работу данных структур. Эти данные были опубликованы в целом ряде работ и компактно представлены в обзоре [2].

Впервые такие эффекты наблюдались в диодных биполярных структурах, где были обнаружены дырочная мо-

нополярность ударной ионизации во всем практически значимом диапазоне электрических полей, аномально большие электрические поля лавинного пробоя, отрицательный температурный коэффициент напряжения лавинного пробоя, расслоение лавинного тока и другие, в большинстве своем, новые эффекты. Отметим, что они наблюдались только в том случае, когда электрическое поле было направлено вдоль оси C , и отсутствовали при ортогональном направлении поля. Здесь же впервые было показано, что влиянию ВШЛ подвержена только электронная подсистема проводимости. Реакции ВШЛ в дырочной подсистеме не проявляются из-за отсутствия мини-зон в спектре валентной зоны [2].

Такие важные явления, как блоховские осцилляции, штарк-фононные резонансы в системе штарковских лестниц, полная локализация первой мини-зоны, резонансное межмини-зонное туннелирование были обнаружены в биполярных триодах [2]. Заметим, что эти эффекты реализовались в виде отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперной характеристике (ВАХ) биполярных триодов.

Интересное следствие ВШЛ было обнаружено в униполярных $n^+ - n^- - n^+$ -диодах, разработанных для наблюдения микроволновой генерации в режиме блоховских осцилляций [2]. При пороговом поле режима блоховских осцилляций в 150 кВ, что много меньше пробойного поля, равного 2000–2500 кВ/см, неожиданно возник ранний пробой. То же самое наблюдалось на ВАХ униполярных полевых вертикальных транзисторов с $n^+ - n^- - n^+$ -каналом, которые по своим потенциальным возможностям считаются одними из наиболее эффективных карбидокремниевых приборов для микроволновой электроники. Как показал проведенный анализ, низковольтный пробой в униполярных $n^+ - n^- - n^+$ -диодах обусловлен генерацией подвижных электрических доменов, в которых электрическое поле превышает пробойное. Приведенные данные показывают, что процесс ВШЛ оказывает сильное влияние на работу перечисленных карбидокремниевых приборов и что очень важно

[¶] E-mail: Sankin@mail.ioffe.ru

учитывать это обстоятельство, принимая решение при разработке конкретного карбидокремниевого прибора.

В данной работе предпринято исследование влияния эффектов ВШЛ на работу такого широко известного SiC-прибора, каким является планарный полевой транзистор с p - n -переходом (*junction field effect transistor* — JFET). Этот прибор интересен еще и тем, что сильное поле в p - n -переходе 6H-SiC JFET направлено вдоль оси ЕСР, что соответствует требованиям существования ВШЛ, а рабочий ток течет перпендикулярно оси C , и влияние ВШЛ на него, на первый взгляд, невозможно. Однако, как будет показано в работе, такое влияние все-таки имеет место.

2. Экспериментальные образцы и техника эксперимента

Технология изготовления JFET была следующей: на подложке n -типа последовательно создавались эпислой p -типа (затвор) и n -типа (канал) с концентрацией соответственно $N_a - N_d = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_d - N_a = 1.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. По металлизации Al/Ni производилась многоступенчатая фотолитография, в результате которой формировалась структура JFET. Толщина n -слоя

составляла около 1 мкм. Затворный n - p^+ -переход был резкий и несимметричный, а размеры канала составляли $784 \times 8 \times 1$ мкм. Сравнительно низкая концентрация $N_a - N_d$ обеспечила появление диффузионной длины электронов в p -слое. На рис. 1 показаны общий вид JFET и направление падающего света, который возбуждал в p - n -переходе затвора фототок короткого замыкания (ФТ). Структура JFET освещалась (рис. 1, *b*) светом различной длины волны со стороны n -слоя. Диффузионные длины электронов и дырок составляли соответственно $L_e = 0.8$ мкм и $L_h = 0.3$ мкм. Сильно поглощаемый свет создавал электронный и дырочный токи примерно в одинаковом соотношении, менее сильно поглощаемый свет обеспечивал преимущество электронного компонента фототока. С помощью света различной длины волны мы могли менять соотношение дырочного и электронного компонентов фототока.

3. Экспериментальные данные и их обсуждение

Исследовалась характеристика ФТ от напряжения (электрического поля) на затворе V_g . Зависимость фототока короткого замыкания I_{ph} от напряжения на затворе в степени $1/2$ ($V_g^{1/2}$) показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, ФТ начинает падать, когда V_g превышает определенную пороговую величину. Это поведение ФТ отличается от традиционного, когда при некотором напряжении ширина слоя объемного заряда, перекрывая ширину канала, перестает расти в n -слое n - p^+ -перехода и растет только в p -слое, но более полого. Поэтому и рост ФТ становится более пологим. Падение ФТ нельзя объяснить и влиянием поверхностной рекомбинации, поскольку, как видно из рис. 2, падение ФТ является более глубоким, когда длина волны возрастает и свет проникает на большую толщину от поверхности, что противоречит предположению, связанному с поверхностной рекомбинацией. Спектрально зависимый эффект более глубокого падения ФТ объясняется увеличением электронного компонента ФТ, который как раз подвержен влиянию ванье–штарковского (ВШ) квантования. Аналогичное исследование зависимости ФТ- $f(V_g^{1/2})$ на кремниевом промышленном JFET, в котором, как известно, невозможен режим ВШ лестниц, дало тривиальный результат (см. рис. 2, *b*). Ранее ОДП при исследовании фоточувствительности p - n -переходов на SiC [2] не наблюдалась, что, очевидно, было связано с практическим отсутствием диффузионной длины электронов в p -слое из-за сильного легирования последнего (больше 10^{20} см^{-3}). Однако в данном случае наличие $L_e = 0.8$ мкм обеспечивало весьма заметное присутствие электронного компонента ФТ. Среднее значение порогового поля в p - n -переходе было порядка 1000 кВ/см. Именно в этом диапазоне полей наблюдались ОДП на вольт-амперных характеристиках SiC специальных биполярных транзисторных структур, обусловленные режимом ванье–штарковских лестниц [2]. Мы предположили,

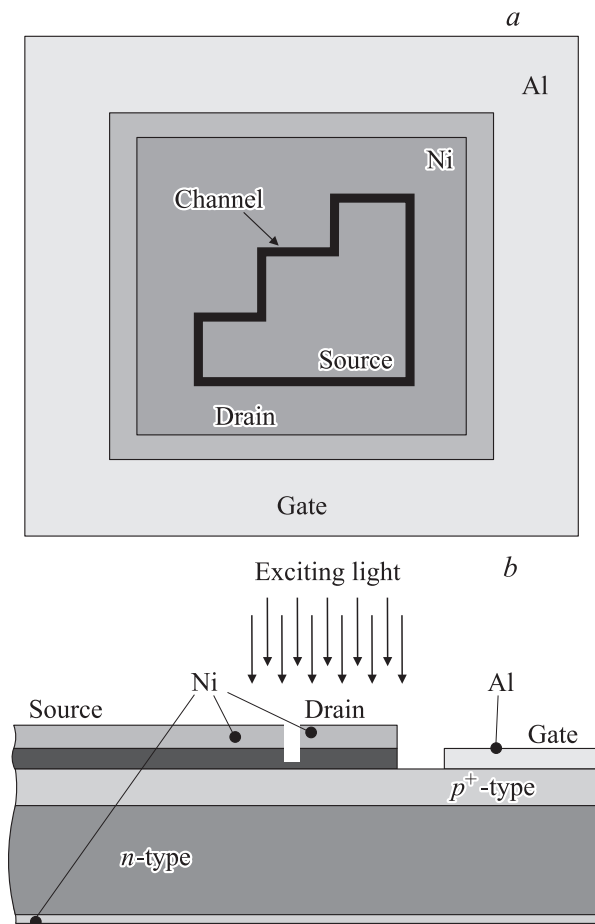


Рис. 1. 6H-SiC JFET структура: *a* — общий вид, *b* — сечение.

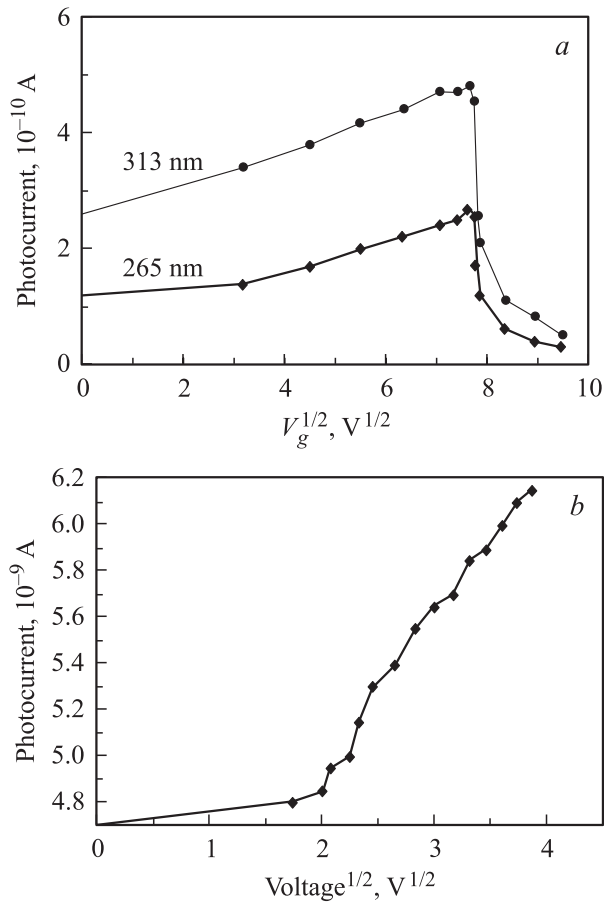


Рис. 2. *a* — Зависимость фототока от напряжения на затворе 6H-SiC JFET структуры, *b* — то же для кремниевого промышленного JFET.

что и в нашем случае имеет место аналогичный эффект. Фундаментальный критерий существования ВШ лестниц выражается как

$$\tau > T = 2\pi\hbar/eFa, \quad (1)$$

где τ — время рассеяния невозмущенного движения электрона, T — время, за которое электрон (заряда e) проходит в зоне Бриллюэна от $-\pi/a$ до $+\pi/a$ под действием электрического поля F , совпадающим с осью СР, a — период СР. В режиме ВШ лестниц теория дает падение подвижности с полем $\mu \propto 1/F$ [3,4], что равнозначно возникновению ОДП. Эффект ОДП наблюдался при полях от 850–950 кВ/см, что при $a = 7.5 \text{ \AA}$ дает $T = (5.2-5.8) \cdot 10^{-14}$ с. Это существенно меньше $\tau = 5.0 \cdot 10^{-13}$ с [2], что удовлетворяет соотношению (3). Кроме того, следует подчеркнуть и то обстоятельство, что режим ВШ лестниц реально возникает при таких значениях полей, когда штарковская энергия электронов eFa становится сравнимой с половиной ширины мини-зоны, оставаясь меньше ее. В нашем случае эти величины составляли 65–70 и 125 мэВ соответственно. Значения штарковской энергии соответствуют энергиям продольных акустических фотонов в ЕСР политипа

6H-SiC, что позволяет интерпретировать наблюдаемое ОДП как проявление штарк-фононного резонанса в режиме ВШ лестниц [5,6]. Наблюдаемый разброс полей может быть связан с некоторым различием в энергии фононов, участвующих в реализации эффекта в разных образцах.

Наиболее неожиданным оказалось поведение тока сток–исток I_{sd} от величины нейтральной области в канале $d-W$, где d — полная длина канала, W — ширина слоя объемного заряда $n-p^+$ -перехода в n -канале. Очевидно, что $d-W \propto f(V_g)$, поскольку $W \propto V_g^{1/2}$. Характеристика $I_{sd}-f(d-W)$ должна быть линейной с началом в 0 координат. Однако мы видим (рис. 3), что при некоторой величине $d-W$ наблюдается резкое отклонение от линейности и I_{sd} оказывается равным 0 при достаточно большом значении $d-W$, существенно большем 0, причем в этой точке и в максимуме ФТ (рис. 2) значения V_g совпадают, что, по всей вероятности, указывает на физическую связь обоих эффектов. Чтобы избежать случайных совпадений мы исследовали влияние температуры на оба эффекта и обнаружили их полную корреляцию: оба эффекта испытывают сдвиг с повышением температуры в сторону более низких напряжений V_g (рис. 4, *a, b*). По-видимому, указанный

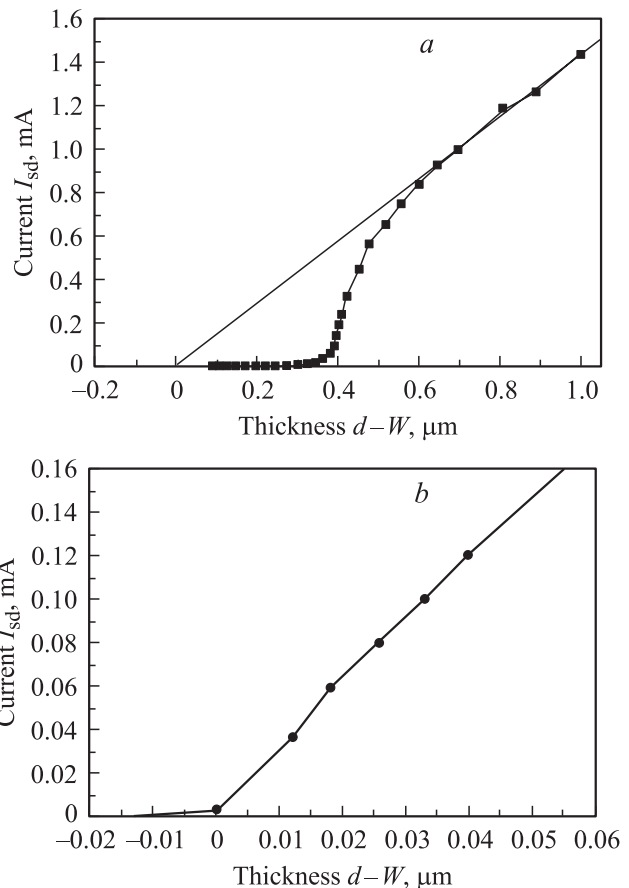


Рис. 3. *a* — зависимость тока исток-сток I_{sd} от толщины нейтральной части канала; *b* — то же для кремниевого промышленного JFET.

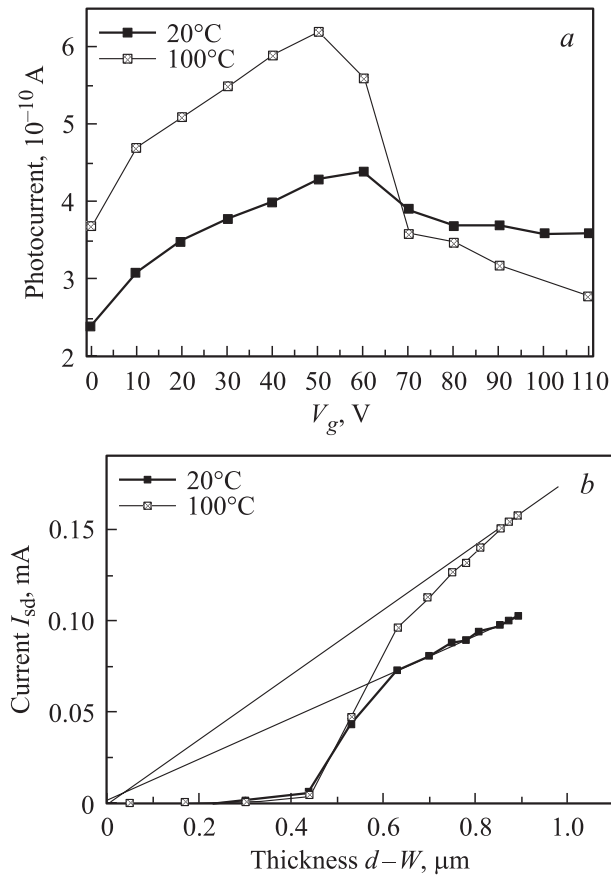


Рис. 4. Зависимости: *a* — фототока от напряжения на затворе 6H-SiC JFET структуры, *b* — тока исток–сток I_{sd} от толщины нейтральной части канала при различных температурах.

сдвиг связан с фоновой подсистемой, в частности с температурным изменением в структуре плотности фононов. Описанный эффект убедительно показывает, что ВШЛ в затворе 6H-SiC JFET радикально меняет основную характеристику прибора $I_{sd}-f(V_g)$. Весьма вероятно, что подобный эффект может наблюдаться и в других приборах 6H-SiC с такой же конфигурацией тока и поля. Отметим, что влиянием поверхностных ловушек на ток I_{sd} нельзя объяснить anomalous поведение характеристики $I_{sd}-f(d-W)$, поскольку в этом случае прямая линия превращалась бы в кривую, которая все равно устремлялась бы в начало координат. Для сравнения мы провели аналогичные исследования на кремниевых промышленных JFET КП103е и КП303и (см. рис. 3, *b*) и не обнаружили какой-либо аномалии. Это без сомнения указывает на специфический для 6H-SiC характер обнаруженных эффектов, обусловленных, с нашей точки зрения, наличием сверхрешеточных особенностей в структуре 6H-SiC. При всей необычности этого эффекта отсечка I_{sd} все-таки происходит обычным образом, а именно перекрытием канала, но при меньших напряжениях V_g . Этому эффекту может быть дано следующее объяснение: согласно вышесказанному, в режиме ВШ лестниц подвижность падает с увеличени-

ем поля, при этом скорость ионизации донорных атомов в канале должна уменьшаться по мере роста напряжения, поскольку время ухода электрона из атомной сферы увеличивается. Вследствие этого падает плотность ионизированных атомов, благодаря чему электрическое поле продвигается в толщу канала на большую ширину, чем при обычной зависимости от концентрации $N_d - N_a$ при отсутствии ВШ лестниц, что и обеспечивает раннюю отсечку тока I_{sd} . Этот эффект ослабления экранирования поля находит отражение на характеристике емкости затворного $p-n$ -перехода от V_g . Отклонение от линейности на характеристике $C^{-2}-f(V_g)$ происходит при $V_g > 1.2V_{gt}$, где V_{gt} — напряжение, при котором начинается отклонение от линейности на характеристике $I_{sd}-f(d-W)$ (рис. 3); $1.2V_{gt}$ — экспериментальная величина.

4. Заключение

1. Показано, что процесс ВШЛ оказывает весьма существенное влияние на работу карбидокремниевых JFET, вызывая аномалию в поведении рабочего тока.

2. Обнаруженный отрицательный фототранскондуктанс в затворном $p-n$ -переходе непротиворечиво объясняется на базе современной теории электронного транспорта в режиме ванье–штарковских лестниц.

3. Высказано обоснованное предположение о механизме ранней отсечки рабочего тока карбидокремниевых JFET. В основе действия этого механизма лежит падение подвижности электронов с увеличением поля в режиме ВШ-лестниц. Обусловленное этим подавление естественной ионизации донорных атомов приводит к ослаблению экранировки электрического поля и ранней отсечке рабочего тока.

4. Ослабление экранировки электрического поля в обратном смещенном $p-n$ -переходе в режиме ванье–штарковских лестниц представляет собой новый эффект, имеющий очевидное практическое значение.

Авторы выражают благодарность П.А. Иванову за стимулирующие дискуссии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 03-02-17617).

Список литературы

- [1] G.N. Wannier. Phys. Rev., **11**, 432 (1960).
- [2] V.I. Sankin. ФТП, **36**, 769 (2002). [Semiconductors, **36**, 717 (2002)].
- [3] R. Kümmel, H. Rauh, E. Bangert. Phys. Status Solidi B, **87**, 99 (1978).
- [4] P.A. Суриц, Б.С. Щамхалова. ФТП, **18**, 178 (1984).
- [5] V.V. Bryksin, Yu.A. Firsov, S.A. Ktitorov. Sol. St. Commun., **39**, 385 (1982).
- [6] D.Emin, C.F. Hart. Phys. Rev. B, **36**, 2530 (1987).

Редактор Л.В. Беляков

Wannier–Stark localization effects in the 6H-SiC planar junction field effect transistor

V.I. Sankin, P.P. Shkrebiy, A.A. Levedev

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

Abstract The dependence of short-circuit photocurrent on the voltage applied to the source–gate (or drain–gate) p – n -junction V_g was studied. Defined value excess V_g causes a negative differential photoconductance, which is determined by Wannier–Stark ladder regime in 6H-SiC natural superlattice. Moreover I_{sd} – V_g dependence shows a drop I_{sd} to zero at V_g significantly less than a pinched-off channel V_g . This phenomenon is explained by a new effect of donor atoms, ionisation depressing in WSL-regime, and consequently by an anomalously weak field screening.