

ВАНЬЕ-ШТАРКОВСКАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ В СВЕРХРЕШЕТКЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

В.И.Санкин, И.А.Столичнов

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 10 марта 1994 г.

В гексагональном кристалле с естественной сверхрешеткой 6H-SiC обнаружены эффекты отрицательного дифференциального сопротивления с пороговыми полями 500, 1200, 2000 кВ/см и резонансное туннелирование с пороговым полем 1800 кВ/см. Анализ экспериментальных данных позволяет рассматривать их как проявление ванье-штарковских состояний при различной степени локализации. Эти результаты подтверждают концепцию существования ванье-штарковских "лестниц", которая подвергается сомнению, обусловленному возможностью межзонного смешивания электронных состояний электрическим полем.

Впервые возможность локализации электронных состояний в сильном электрическом поле была обоснована в 1959 г. [1]. Однако до настоящего времени существование ванье-штарковской локализации (ВШЛ) остается предметом острых дискуссий, причем в некоторых работах подвергается сомнению сама концепция ВШЛ. Бурная полемика, примером которой могут служить несколько последних работ [2-5], свидетельствует о важности этой проблемы для физики кристаллического состояния. Острая потребность в экспериментальных данных, относящихся к рассматриваемой проблеме, очевидна.

Достаточно долгое время изучение ВШЛ проводилось исключительно на гетеропереходных сверхрешетках (СР) AlAs-GaAs. В 1988 г. были получены оптические спектры, свидетельствующие о возникновении в электрическом поле дискретных электронных состояний [6,7]. Казалось бы, на таких объектах должно быть получено отрицательное дифференциальное сопротивление (ОДС), индуцированное ванье-штарковским квантованием. Однако единственными результатами в этой области явились публикации двух групп из Франции [8] и США [9]. Полученные ими результаты интерпретировались в рамках теории [10], однако, по нашему мнению, они допускают и другие интерпретации, не связанные с ВШЛ. Кроме того, данные, изложенные в [8] и [9], не соответствуют друг другу ни качественно, ни количественно. Проблемы, препятствующие изучению ВШЛ на искусственных СР могут быть связаны с их принципиальным недостатком, а именно с наличием интерфейсов между слоями. Такие интерфейсы вызывают рассеяние электронов, способное подавлять эффекты ВШЛ в электронном транспорте.

Устранить этот недостаток позволяет естественная СР, которая возникает вследствие локальной неэквивалентности атомов в некоторых одноосных кристаллах с большой элементарной ячейкой. Среди таких кристаллов наиболее распространенным и стабильным является карбид кремния SiC, имеющий к тому же множество кристаллических форм, так называемых политипов. Совершенство естественной СР, которая свободна от интерфейсов, возможность варьировать постоянную СР, меняя политипы, высокие поля пробоя делают SiC уникальным объектом для исследования ВШЛ.

Для детального исследования ВШЛ в СР необходимо выполнение некоторых условий. Требуется исключить дырочный компонент тока, так как спектр

дырок не подвержен сверхрешеточному расщеплению. Также нужно исключить возрастающую зависимость тока от поля, характерную для традиционных $n^+ - n - n^+$ -структур.

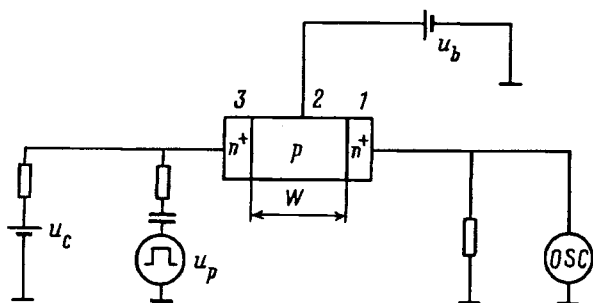


Рис.1. Электрическая схема измерений

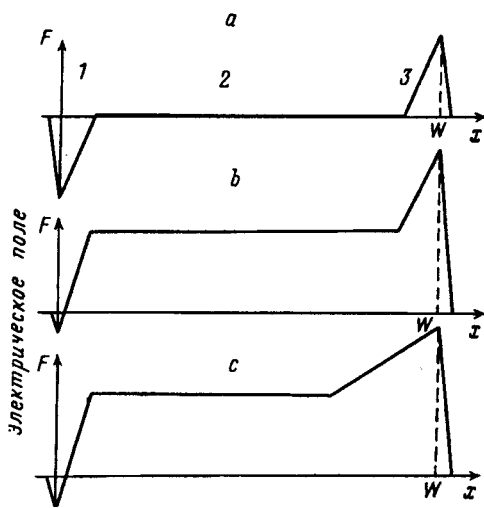


Рис.2

Рис.2. Распределение электрического поля в экспериментальной структуре: $a - U_b = 0, U_c = 0, U_p = 0$; $b - U_b \neq 0, U_c = 0, U_p \neq 0$; $c - U_b \neq 0, U_c \neq 0, U_p \neq 0$

Рис.3. Вольт-амперная характеристика экспериментальной структуры 6H-SiC в режиме, представленном на рис.2с

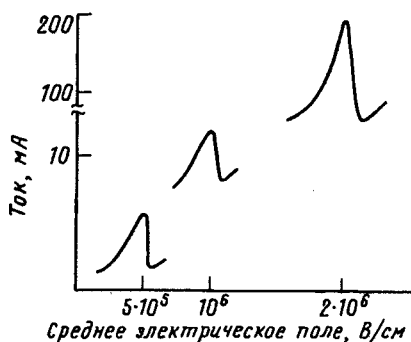


Рис.3

Перечисленным требованиям удовлетворяет разработанная нами трехэлектродная структура, представленная на рис.1. Ее свойства и механизм работы описаны в [11]. Здесь мы приведем лишь ее основные характеристики в соответствии с рис.1. Переход 1 является источником электронов (эмиттером), область 2 – активная область (база), переход 3 является коллектором. Источник прямого смещения U_b предназначен для изменения высоты потенциального барьера перехода 1. Источник импульсного напряжения U_p обеспечивает инжекцию электронов в область 2 и квазиоднородное электрическое поле в этой области. Распределения электрического поля в структуре в трех случаях представлены на рис.2. В наших предыдущих работах [12,13] использовался вариант с $U_b \neq 0, U_p \neq 0$ и $U_c = 0$, рис.2б. В этом случае основные события происходили в области 2, где поле было практически однородным. В резуль-

тате проведенного исследования впервые было получено сильное ОДС, которое по всем данным соответствовало критериям, приведенным в [10].

Согласно теории ВШЛ для достаточно широкой минизоны данный эффект соответствует начальной фазе процесса локализации. Очевидно, более высокая степень локализации требует увеличения электрического поля до значений

$$F \geq E_1/ed, \quad (1)$$

где E_1 – ширина первой минизоны, e – заряд электрона, d – постоянная сверхрешетки. По имеющимся оценкам, это должны быть поля больше 1000 кВ/см. Такая ситуация была реализована в нашей структуре (распределение поля представлено на рис.2с). На переход коллектор – база подавалось постоянное смещение, и поэтому поле было существенно неоднородным. Для количественных оценок использовались средние значения поля, которые для линейного распределения вдвое меньше максимальных. Таким образом, удалось создать поля, величины которых превышали 2000 кВ/см. Роль импульсного поля заключалась в том, чтобы обеспечить инжекцию электронов из эмиттера в базу и дрейф через область 2. Таким образом, в область сильного поля 3 попадал чистый, без дырок, поток электронов.

Опыт ставился следующим образом. Импульсный ток через структуру устанавливался подачей импульсного напряжения и смещением перехода эмиттер – база в прямом направлении. Затем увеличивалось постоянное напряжение U_c на коллекторном переходе, что приводило к расширению области объемного заряда 3 в область 2 и нарастанию поля в этой области. По мере увеличения этого поля импульсный ток через структуру медленно увеличивался. Однако при достижении некоторых значений среднего поля вместо монотонности в изменении тока от поля возникали резкие особенности. На рис.3 это видно на представленной зависимости тока от среднего поля. Заметим, что эти данные получены только для 6H-SiC. Особенности в виде резкого падения тока или, напротив, резкого увеличения тока наблюдались при значениях среднего поля, превышающих 500, 1200, 1800 и 2000 кВ/см.

Нам представляется наиболее вероятной интерпретация этих результатов в рамках теории ВШЛ, так как другие теории не позволяют выстроить непротиворечивую картину.

1. ОДС, соответствующее наименьшему значению порогового поля $F_t = 500$ кВ/см, по логике развития процесса ВШЛ должно быть обусловлено брэгговским отражением от края минизоны [10]. Аналогичный по своему механизму эффект был нами получен в [12], но в условиях квазиоднородного электрического поля, чем, по-видимому, в основном, и объясняется заметное отличие величины порогового поля в [12] от вышеприведенного значения.

2. ОДС при среднем поле, превышающем $F_t = 1200$ кВ/см, соответствует более высокой степени локализации и должно быть отнесено к случаю, определяемому соотношением (1). Величина штарковской энергии $eF_t d$ равна 90 мэВ, что неплохо соответствует (1) при ширине первой минизоны 0,1 – 0,4 эВ, полученной из приближенных оценок по результатам [14,15]. Здесь d – постоянная СР, равная 7,5 Å. Сделанная оценка показывает, что данный эффект, вероятно, обусловлен перескоковым механизмом токопротекания между отдельными штарковскими уровнями [16].

3. Увеличение штарковской энергии до значений

$$F_t \geq E_{12}/ed, \quad (2)$$

где E_{12} – зазор между первой и второй минизонами, должно приводить к резонансному туннелированию в вышележащую минизону и, следовательно, к всплеску тока. Резкий рост тока, наблюдавшийся нами при $F_t = 1800$ кВ/см, мы объясняем именно этим механизмом [17]. Для численных оценок здесь, по-видимому, уместно использовать значения максимального поля $F_m = 3600$ кВ/см. При этом $F_m ed = 270$ мэВ, а E_{12} по оценкам [14,15] составляет 0,3–0,5 эВ. Учитывая приближенность сделанных оценок, можно считать полученное соответствие вполне удовлетворительным.

4. Переход электронов из первой минизоны во вторую является переходом из локализованного состояния в делокализованное. Следовательно, после такого перехода электрон может пройти во второй минизоне те же ступени локализации, что и в первой. Поэтому, возникающее при увеличении среднего поля выше 2000 кВ/см падение тока мы связываем с брэгговским отражением от края второй минизоны.

Таким образом, нами предложен альтернативный вариант изучения ВШЛ на новой группе объектов – естественных СР карбида кремния. Представленные экспериментальные данные характеризуют разные фазы развития процесса ВШЛ. Впервые получена последовательная картина развития ВШЛ до полей, близких к полям пробоя. Эти данные являются серьезным экспериментальным доказательством существования ВШЛ в кристаллах. Обнаруженные эффекты ВШЛ в широком диапазоне энергий согласуются с выводом работы [2] о том, что вань-штарковские "лестницы" не исчезают в результате межзонного смешивания электронных состояний электрическим полем.

Работа поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 94-02-06 258-а).

1. G.N.Wannier, *Phys. Rev.* **11**, 432 (1960).
2. D.Emin and C.F.Hart, *Phys. Rev.* **B36**, 7353 (1987).
3. L.Kleinman, *Phys. Rev.* **B41**, 3857 (1990).
4. J.Zak, *Phys. Rev.* **B43**, 4519 (1991).
5. J.A.Mackinnon, *Phys. Rev.* **B43**, 5166 (1991).
6. P.Voisin, J.Bleuse, C.Bouche et al., *Phys. Rev. Lett.* **61**, 1639 (1988).
7. M.K.Gibb and E.Lacelle, *Phys. Rev.* **B44**, 8568 (1990).
8. A.Sibille, H.F.Palmier, H.Wang, and F.Mollot, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 52 (1990).
9. F.Bettram, F.Capasso, D.L.Sivco et al., *Phys. Rev. Lett.* **64**, 52 (1990).
10. L.Esaki and R.Tsu, *IBM J. Res. Dev.* **14**, 61 (1970).
11. В.И.Санкин, А.В.Наумов, А.А.Вольфсон и др., *Письма в ЖТФ* **15**, 43 (1989).
12. В.И.Санкин, А.В.Наумов, *Письма в ЖТФ* **16**, 91 (1990).
13. В.И.Санкин, А.В.Наумов, И.А.Столичнов, *Письма в ЖТФ* **17**, 38 (1991).
14. А.П.Дмитриев, А.С.Константинов, Д.П.Литвин, В.И.Санкин, *ФТП* **7**, 1093 (1983).
15. В.И.Санкин, Ю.А.Водаков, Д.П.Литвин, *ФТП* **18**, 2146 (1984).
16. R.Tsu and G.Dohler, *Phys. Rev.* **B12**, 680 (1975).
17. Р.Ф.Казаринов, Р.А.Суриц, *ФТП*, **5**, 797 (1971).