

- [1] Безарбаев Н.Н., Евстифеев В.В., Крылов Н.М., Кудряшова Л.Б. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 9. с. 140-142.
- [2] Парлис Э.С., Тураев Н.Ю., Умаров Ф.Ф., Нижная С.Л. Теория рассеяния атомов средних энергий поверхностью твердого тела. Ташкент; 1987. 210 с.
- [3] Шелякин Л.Б., Мосунов А.С., Юрасова В.Е. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 5. С. 37-42.
- [4] Evstifeev V.V., Ivanov I.V. // Surface Sci. 1989. 217. P. L373-L376.
- [5] Hoek V.d. P.J., Tenner A.D., Kleyn A.W. // Phys. Rev. 1986. V. B34. P. 5030-5042.

Научно-исследовательский
институт прикладной физики
Ташкентского государственного
университета им. В.И. Ленина

Поступило в Редакцию
24 января 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 7

12 апреля 1990 г.

05.2

© 1990

ЭФФЕКТ ВАНЬЕ-ШТАРКА И ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

В.И. С а н к и н, А.В. Н а у м о в

В конце 50-х годов [1] было предсказано, что приложение электрического поля к твердым телам с зонным спектром должно приводить к интересным квантово-механическим эффектам. Активный исследовательский поиск в этом направлении начался вслед за первыми публикациями [2, 3] о создании искусственных сверхрешеток (СР) в полупроводниках и возможности получения отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Этот поиск интенсивно продолжается и в последнее время [4-9], однако ОДС, обусловленное квантованием Ванье-Штарка (В-Ш), до сих пор не обнаружено.

В данной работе приведены исследования ВАХ в сильных электрических полях структур 6H-карбида кремния, полупроводника с естественной СР. В работах по исследованию ударной ионизации [10-12] было показано, что СР в 6H-SiC определяет свойства транспорта электронов (но не дырок) в очень сильных электрических

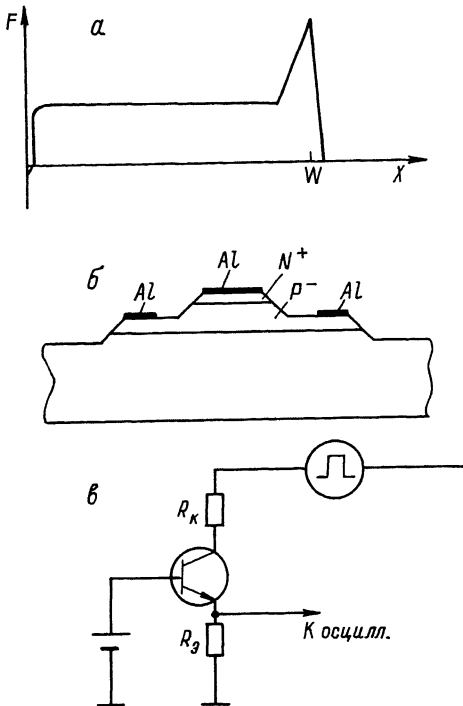


Рис. 1. а - распределение импульсного поля в структуре, б - схематическое изображение структуры, в - электрическая схема измерений.

ких полях до $F = 5 \cdot 10^6$ В/см. Согласно сделанным по этим данным оценкам, ширина первой минизоны должна составлять $E_1 \approx (0.2-0.4)$ эВ, а зазор между первой и второй минизонами $E_{12} \approx (0.4-0.5)$ эВ, что представляется благоприятным для наблюдения эффекта В-Ш в таком полупроводнике.

Требуемый объект для экспериментального исследования должен обладать такими свойствами, которые позволили бы реализовать в нем контролируемый поток электронов при наличии сильного электрического поля. Как известно из аналогичных исследований эффекта Ганна, для этого требуется полуизолирующий материал. К сожалению, полуизолирующий карбид кремния n -типа проводимости является, по крайней мере, большой редкостью. Поэтому мы попытались создать его искусственный эквивалент, и в качестве

объекта для исследований была выбрана трехэлектродная карбид-кремниевая структура $N^+p^-N^+$ типа, базовый слой которой, в отличие от известных транзисторов на основе карбида кремния [13], представлял собой легированный глубоким акцептором Sc слой p -типа проводимости. Так как скандий является глубокой примесью, то, во-первых, он имеет довольно большое время перезарядки при комнатной температуре, а, во-вторых, при его концентрации в базе $N_A - N_D \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрация свободных дырок при $T=300 \text{ К}$ составляет лишь $p=10^{10} \text{ см}^{-3}$. В связи с этим эмиттерный переход $N^+p^-(Sc)$ не открывается при приложении импульсного прямого смещения с длительностью импульсов $\tau_H \leq 10^{-6} \text{ с}$, в то же время импульсное обратное смещение на коллекторном переходе $p^-(Sc)-N^+$ экранируется на длинах, соответствующих не концентрации Sc в базе, а концентрации свободных дырок. Поэтому ширина области объемного заряда может достигать сотен мкм. В рассматриваемых структурах ширина базы W составляла 3–5 мкм, поэтому база полностью перекрывалась областью объемного заряда коллекторного перехода, а поле в ней было практически однородным и равным отношению $F=V/W$. Распределение импульсного поля в структуре показано на рис. 1. Заметим, что направление поля совпадало с направлением оси CP . На этом же рис. показаны вид структуры и электрическая схема измерений. Структура, согласно транзисторной терминологии, включалась по схеме с общим эмиттером. В соответствии с вышесказанным, переход эмиттер–база смешался постоянным напряжением в то время, как на переход коллектор–база подавалось обратное смещение импульсами длительностью $\tau_H = (2-3) \cdot 10^{-7} \text{ с}$. Более подробно работа такой структуры описана в [14]. Там же приведена ее ВАХ для полей $F \approx 6 \cdot 10^4 \text{ В/см}$. В данной работе измерения производились до полей $F \approx 3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$. При увеличении поля до $F = (1.1-1.7) \cdot 10^5 \text{ В/см}$ ток через структуру скачкообразно уменьшается и далее снова плавно нарастает (рис. 2). При обратном ходе, т.е. при уменьшении напряжения на структуре, скачок тока происходит при несколько меньшем напряжении, чем при прямом ходе. Таким образом, наблюдается некоторый гистерезис переключения. Указанный разброс значений электрического поля обусловлен возможной неточностью в определении ширины базового слоя W , которое производилось по величине области люминесценции с помощью микроскопа МДЛ.

N^- -образность приведенной ВАХ, вероятно, можно объяснить и другими причинами, однако качественные характеристики обсуждаемого явления согласуются со всеми критериями именно эффекта В–Ш [15]. Из соотношения $\tau = h/ef\mathcal{E}d$ при среднем значении поля $F \approx 1.5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ и периоде CP $d = 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ получаем $\tau = 6 \cdot 10^{-14} \text{ с}$, что согласуется с оценкой $\tau = m_{Hj}^* \mu_{Hj} / e$ при $m_{Hj}^* = m_0$ и $\mu_{Hj} = 100 \text{ см}^2/\text{В с}$. Возрастающая ветвь ВАХ при $F > 2.5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ обусловлена, по всей вероятности, двумя процессами: ростом инжекции электронов в базу при увеличении импульсного напряжения [14] и поперечным рассеянием.

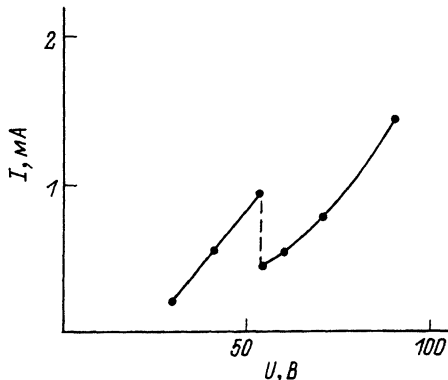


Рис. 2. ВАХ структуры в импульсном режиме.

Известно, что к N -образной ВАХ приводит и рекомбинационная неустойчивость [16]. Однако время пролета электронов через базовый слой составляет менее 10^{-10} с, что существенно меньше времени рекомбинации.

Таким образом, приведенные результаты позволяют считать, что в данной работе впервые обнаружено квантование зонного спектра в α -карбиде кремния, вызванное сильным электрическим полем, и впервые в полупроводнике со сверхрешеткой при комнатной температуре получена N -образная ВАХ, обусловленная локализацией Ванье-Штарка.

В заключение мы благодарим Ю.А. Водакова и Р.А. Суриса за полезные обсуждения и М.Г. Рамма, А.А. Вольфсона и А.В. Суворова за технологическое обеспечение работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Wannier G.H. // Phys. Rev. 1960. V. 11. P. 432-439.
- [2] Келдыш Л.В. // ФТТ. 1962. С. 2657.
- [3] Esaki L., Tsu R. // IBM J. Res. Dev. 1970. V. 14. P. 61.
- [4] Choi K.K., Levine B.F., Malik R.J., Walker J., Bethea C.C. // Phys. Rev. B. 1987. V. 35. P. 4172-4175.
- [5] Mendez E.E., Agullo-Rueda F., Hong J.M. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. P. 2426-2429.
- [6] Bleuse J., Bastard G., Voisin P. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. 220-223.

- [7] Voisin P., Bleuse J., Bouches C., Gaillard S., Alibert C., Regreny A. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 1639-1642.
- [8] Grah H.T., Schneider H., Klitzing K. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 1757-1759.
- [9] Esaki L. // IEEE J. of Quant. Elect. 1986. QE-22. P. 1611-1624.
- [10] Дмитриев А.Д., Константинов А.О., Литвинов Д.П., Санкин В.И. // ФТП. 1983. № 7. С. 1093-1098.
- [11] Санкин В.И., Водаков Ю.А., Литвин Д.П. // ФТП. 1984. № 18. С. 2146-2149.
- [12] Водаков Ю.А., Литвин Д.П., Санкин В.И., Мохов Е.Н., Роенков А.Д. // ФТП. 1985. № 19. С. 814-818.
- [13] Munch W., Hoessk P. Sol. St. Electronics, 1978, 21, 479-481.
- [14] Санкин В.И., Наумов А.В., Вольфсон А.А., Рамм М.Г., Смеркло Л.М., Суворов А.В. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16.
- [15] Шик А.Я. // ФТП. 1974. № 8. С. 1841-1864.
- [16] Волков А.Ф., Коган Ш.М. // УФН. 1968. № 96. С. 633-672.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
29 декабря 1989 г.