

05.2; 06.2

© 1991

ЭФФЕКТ ВАНЬЕ-ШТАРКА. ПРИРОДА ОТРИЦАТЕЛЬНОГО
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В 4Н-
И 6Н- КАРБИДЕ КРЕМНИЯВ.И. С а н к и н, А.В. Н а у м о в,
И.А. С т о л и ч н о в

Эффект Ванье-Штарка (В-Ш) представлял и представляет интерес не только с точки зрения чистой науки. Большое практическое значение имеет и тот факт, что данным эффектом обусловлено отрицательное дифференциальное сопротивление (ОДС), с чем связывалась перспектива разработки эффективных сверхвысокочастотных приборов. Искусственные сверхрешетки (СР) создавались именно для этой цели. Однако двадцатилетний период интенсивных экспериментов не дал положительного результата: ОДС не получено до сих пор. Правда, в оптике, согласно нескольким сообщениям, наблюдались признаки квантовая В-Ш [1].

Как известно, еще до создания искусственных СР, существовали материалы, в том числе и полупроводниковые, в которых сверхструктура является естественным свойством кристаллического строения вещества. К числу таких полупроводников относится α -карбид кремния. Под этим названием объединено большое количество политипов, и каждый из них является отдельным полупроводником со своими параметрами СР. К числу наиболее распространенных политипов относятся 6Н- и 4Н-SiC.

В работах [2, 3] интерпретация фоновой структуры спектров люминесценции и комбинационного рассеяния в α -карбиде кремния производилась на основе сверхструктурной модели. Однако каких-либо особенностей зонной структуры, характерных для СР, в этих работах не было выявлено.

Впервые однозначный ответ о наличии в зонной структуре α -карбида кремния узкой зоны, отделенной от вышележащей зоны достаточно большим зазором, был дан в работах по ударной ионизации в α -SiC [4-6]. Эксперимент проводился для двух направлений электрического поля параллельно $F // C$ и перпендикулярно $F \perp C$ оси СР. Было установлено, что при $F // C$ наблюдается уникальная ситуация, выражающаяся в том, что процесс ударной ионизации осуществляется только дырками, а электроны выключены из этого процесса до очень больших полей. Именно этим объясняется аномально большое напряжение лавинного пробоя, превышающее расчетное в 4-5 раз. Картина становится совершенно иной, когда направление поля меняется на $F \perp C$. При этом скорости ударной ионизации дырок и электронов практически совпадают, а

напряжения пробоя снижается почти в 3 раза. Даже действие такого симметричного воздействия, как температура, оказывается полярным: напряжение лавинного пробоя для $F \perp C$ увеличивается с температурой, что является обычным свойством всех полупроводников, и падает с температурой, когда $F // C$. Эти и некоторые другие явления, наблюдаемые в α -карбиде кремния, привели к однозначному выводу об узкой разрешенной зоне (минизоне) для электронов в направлении, параллельном оси CP . Со всей определенностью можно сказать, что расстояние до вышележащей зоны больше, чем 0.5 эВ, поскольку даже в поле $F = 5 \cdot 10^6$ В/см отсутствует заметное межзонное туннелирование.

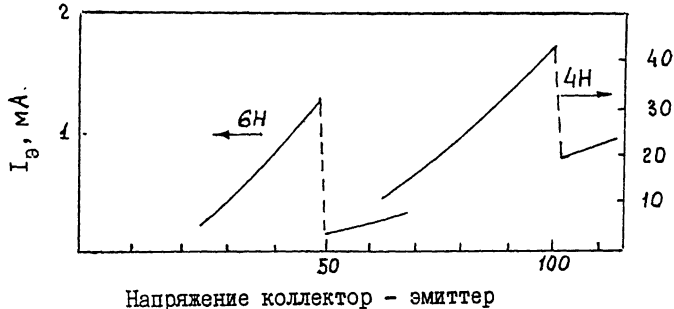
Следует также подчеркнуть, что дырочная зона, как показано в [5], не имеет особенностей, обусловленных эффектом узкой зоны.

Согласно высказанной в [5, 6] модели, в процессе разогрева электрон, достигая края минизоны, испытывает брэгговское отражение, не имея возможности туннелировать в вышележащую зону, остается плененным в узкой зоне и не увеличивает своей энергии до порога ионизации. Однако наблюдать при этом ОДС невозможно, поскольку при фотовозбуждении и в процессе ударной ионизации в обратносмещенном р-п переходе рождаются не только электроны, но и дырки, а поведение последних тривиально, так как валентная зона не имеет особенностей. К тому же в р-п переходах, используемых для исследований, поле было неоднородным $F \sim \sim (W - X)^{1/2}$, а полная ширина слоя объемного заряда W была около 0.5 мкм.

Все попытки реализовать эффект ОДС прямым образом, приложив электрическое поле к образцу п-типа с контактами, не увенчались успехом по нескольким причинам, главными из которых, по нашему мнению, являются: джоулев разогрев, интенсивное электрон-электронное рассеяние и неблагоприятное влияние контактов.

Указанные обстоятельства удалось преодолеть созданием оригинальной транзисторной структуры (ТС), описанной нами в предыдущих работах [7, 8]. Область сильного поля в такой структуре составляла 5-20 мкм. При этом само поле было существенно однородным, а поток носителей электронным. Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) упомянутых структур, созданных на основе 6Н-SiC, выявило наличие сильного эффекта ОДС, возникающего в поле $F = 1.5 \cdot 10^5$ В/см. В [8] показано, что этот результат коррелирует с основными критериями эффекта Ванье-Штарка. Однако выполнение критериев является необходимым условием существования эффекта, но не достаточным доказательством его природы.

Весьма показательными в этом отношении являются изменения порогового поля при преднамеренном варьировании параметров эффекта. Надо сказать, что параметров эффекта В-Ш не много и главным среди них является ширина первой разрешенной минизоны Δ , величина которой равна $\frac{\hbar^2 k_d^2 d}{2m}$, где $k_d = \frac{\pi}{d}$ - значение квазиимпульса на краю первой зоны Бриллюэна, а d - период CP .



Напряжение коллектор - эмиттер

Вольт-амперные характеристики 4H- и 6H- карбидкремниевых ТС.

Эффект характеризуется прямопропорциональной зависимостью порогового поля от Δ , и, следовательно, ее наличие является объективным доказательством тождественности наблюдаемого явления с эффектом В-Ш.

В искусственных сверхрешетках для этого изменяют число слоев в композиции при неизменности самого состава компонент [9]. В карбиде кремния об этом позаботилась природа, создав целый ряд политипов, неизменных по химическому составу, но различающихся числом атомных слоев в сверхструктурном периоде, и, следовательно, периодом СР. Например, период СР в 6H-SiC в 1.5 раза больше, а ширина первой разрешенной минизоны, по крайней мере, в 2 раза меньше, чем в 4H-SiC [6].

Согласно критерию эффекта В-Ш $e\mathcal{E}l \gg \Delta$, при одинаковых значениях длин свободного пробега l пороговое поле должно измениться соответственно изменению Δ . По всем другим характеристикам, включая параметры потенциальных барьеров, механизм текопереноса, примесный состав и параметры примесного уровня в базе, транзисторные структуры на основе 4H- и 6H-SiC были идентичными. Поэтому, если природа ОДС в них обусловлена не эффектом В-Ш, величина порогового поля не должна была бы существенно измениться.

ВАХ в допороговых полях 4H-SiC ТС подобна 6H-SiC ТС, что видно из приведенных на рисунке кривых. Качественный характер эффектов, наблюдаемых в обоих политипах, также одинаков. Видимые количественные различия наблюдаются в величинах пороговых полей, которые в 4H-SiC вдвое больше, чем в 6H-SiC. Таким образом, мы получили увеличение порогового поля в соответствии с увеличением ширины минизоны Δ . Это позволяет сформулировать следующее утверждение: в основе наблюдаемого ОДС в 6H- и 4H-карбиде кремния лежит эффект В-Ш и механизм брэгговских отражений от края минизоны.

Данный результат является первым экспериментальным воплощением теоретических выводов, полученных тридцать лет тому назад Ванье и несколько позднее Келдышем. Тот факт, что ОДС получено

на карбиде кремния в материале с естественной СР, дает возможность путем сравнительного анализа всех экспериментальных условий понять, почему аналогичный результат не получен на искусственных СР и тем самым способствовать определенному разрешению этой проблемы. Очевидно, что эффект носит строго ориентационный характер и движения электронов должно быть параллельным оси СР. В связи с этим следует отметить тот экспериментальный факт, что среди изготовленных ТС лишь третья часть была „результативной“, то есть именно на них наблюдалось ОДС, а остальные обладали характеристикой инжекционно пролетного диода [7]. Хотя этот факт пока не получил однозначного толкования, наиболее реалистичным представляется предположение о том, что только в „результативных“ ТС электрическое поле коллинеарно оси СР. Данное обстоятельство может быть следствием локальных совпадений плоскости эпитаксиального роста и базальной кристаллической плоскости.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Voisin P., Bleuse J., Bouche C., Gaillard S., Alibert C., Regreny A. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. N 14. P. 1639-1642; // Bleuse J., Bastard G. and Voisin P. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 3. P. 220-223.
- [2] Choyke W.J., Patrick L. // Phys. Rev. 1962. V. 127. N 6. P. 1868-1877.
- [3] Feldman D.W., Parker J.H., Choyke W.J., Patrick L. // Phys. Rev. 1968. V. 170. N 3. P. 698-704.
- [4] Дмитриев А.Д., Константинов А.О., Литвин Д.П., Санкин В.И. // ФТП. 1983. Т. 17. № 6. С. 1093-1098.
- [5] Санкин В.И., Водаков Ю.А., Литвин Д.П. // ФТП. 1984. Т. 18. № 12. С. 2146-2149.
- [6] Водаков Ю.А., Литвин Д.П., Санкин В.И., Мохов Е.Н., Рюенков А.Д. // ФТП. 1985. Т. 19. № 4. С. 814-818.
- [7] Санкин В.И., Наумов А.В., Вольфсон А.А., Рамм Г.М., Смеркло Л.М., Суворов А.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 24. С. 43-46.
- [8] Санкин В.И., Наумов А.В. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 7, С. 91-95.

- [9] S i b i l l e A., P a l m i e r J.F.,
W o n g H., E s n a u l t J.C., M o l-
l o t F. // Solid. St. Electronics. 1989.
V. 32. N 12. P. 1461-1465.
- [10] С а н к и н В.И. Диссертация на соискание ученой степени
канд. физ.-мат. наук, Л., ЛЭТИ им. Ульянова-Ленина.
1978. С. 136-141.

Поступило в Редакцию
13 ноября 1991 г.