

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА СВОЙСТВА БАРЬЕРОВ ШОТТКИ Cr—SiC n- И p-ТИПА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Верничикова Р. Г., Санкин В. И.

Во многих полупроводниках с преимущественно ковалентной связью наблюдается аномальное смещение уровня Ферми на поверхности, так называемый пиннинг. В работах [1-3] было высказано предположение, что природа данного явления связана с дефектами, которые возникают у поверхности полупроводника при формировании барьеров. Новая модель получила широкое развитие, и, в частности, в работе [4] было теоретически показано, что собственные объемные вакансии создают на поверхности кристалла свой спектр состояний, влияющих на положение уровня Ферми.

В карбиде кремния наблюдается значительная концентрация собственных вакансий, существенно различающаяся по величине в разных поли типах (при относительно небольшом различии в ширине запрещенной зоны), что позволило на этом материале в чистом виде проверить реалистичность дефектной модели, объясняющей пиннинг уровня Ферми на поверхности полупроводника [5]. В этой работе нами было показано, что пиннинг уровня Ферми увеличивается с ростом концентрации углеродных вакансий.

В работе [5] формирование барьеров Шоттки (БШ) Cr—SiC производилось по следующей схеме: а) химическая обработка подложек SiC, которая заключалась в травлении в расплаве KOH, кипячении в слабом кислотном растворе и дистиллированной воде (при такой химической обработке на поверхности SiC

(0001) образуется тонкий слой аморфного гидратированного окисла SiO₂ (10—20 Å) [6]); б) предварительный прогрев в вакууме до 700—800 К; в) напыление на охлажденную до $T \sim 400$ К подложку. В процессе предварительного прогрева в вакууме до 700—800 К происходят дегидратация окисла и удаление с границы раздела SiO₂—SiC адсорбата (например, гидроксильных групп OH⁻ [7]), что, в свою очередь, может приводить к потере информации о свойствах поверхностных центров.

Энергетический уровень поверхностных состояний, образованных адсорбированным веществом и поверхностным центром, определяется энергией связи инородных атомов или молекул с собственными поверхностными состояниями. Если на поверхности твердого тела происходит кислотно-основное взаимодействие, при котором адсорбируется основание на поверхностном центре, то энергия незаполненных орбиталей этого центра должна быть близка к энергии неогосударственной электронной пары основания. Поэтому присутствие адсорбата помогает выявить энергетические характеристики поверхностных состояний.

Задача данной работы — исследование влияния адсорбата на характеристики (ϕ_b , ВАХ) поверхностно-барьерных структур электронной и дырочной электропроводности, а также их изменения при постепенном термическом отжиге готовых структур. Постановка задачи преследовала следующие цели: 1) расширить сведения об энергетическом спектре поверхностных состояний БШ Cr—SiC, 2) получить дополнительные данные для выработки оптимальных условий приготовления поверхностно-барьерных структур Cr—SiC с заданными характеристиками.

Как и в [5], БШ Cr—SiC создавались вакуумным напылением Cr на поверхность (0001) SiC различных поли типов. Но, для того чтобы сохранить адсор-

Изменение высоты барьера Шоттки
в Cr—SiC

T _{отж.} , К	ϕ_{b_n} , эВ		
	(ВАХ)	(C - V)	$J^{1/2} = f(\eta_{\omega})$
320	0.85	0.82	0.83
373	0.86	0.93	0.94
473	0.93	1.05	1.04
573	1.02	1.3	1.24
673	1.07	1.43	1.44

бат, образующийся на поверхности образца после химической обработки, в схему формирования барьера было внесено изменение: Сг наносился на холодную ($T=320$ К) подложку без предварительного прогрева.

Измерения φ_{bn} на образцах электронного типа проводимости производились методами вольтамперных, вольтемкостных и спектральных характеристик при комнатной температуре. Первые измерения проводились на БШ, сформированных на холодной подложке, без предварительного прогрева. После этого образцы отжигались в вакууме при соответствующей температуре и весь комплекс измерений на нем повторялся. На образцах с дырочным типом проводимости значения φ_{bp} измерялись только методом Фаулера, поскольку при комнатной температуре на образцах p -типа не удается провести измерения емкости из-за больших последовательных сопротивлений p -слоя.

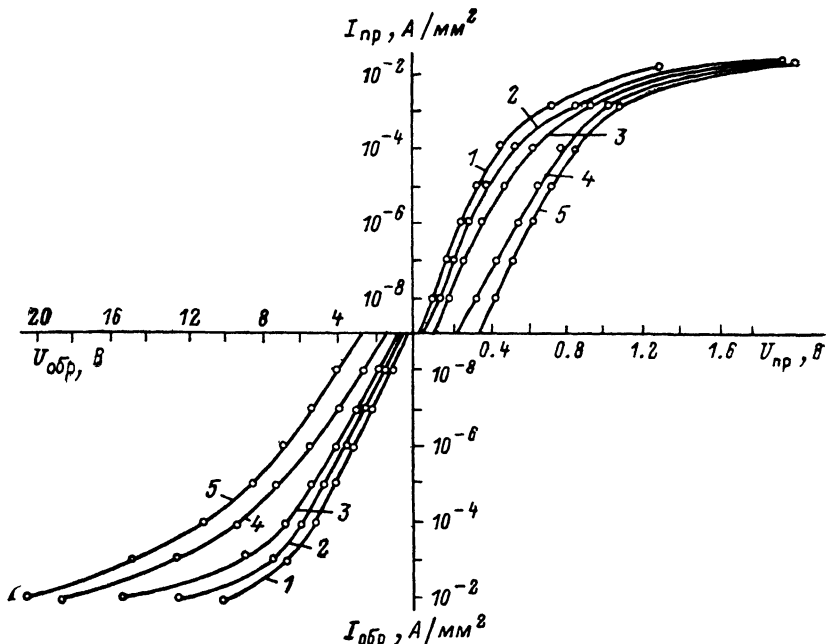


Рис. 1. ВАХ поверхностно-барьерной структуры политипа 10H-SiC для различных температур отжига.

$T_{отж}$, К: 1 — 323, 2 — 373, 3 — 473, 4 — 573, 5 — 673.

На рис. 1 представлены ВАХ при различных температурах отжига на одном из политипов. В таблице для этого же образца даны φ_{bn} , полученные всеми использованными в работе методами. Значения φ_{bn} на неотожженной структуре, полученные различными методами, совпадают. С ростом температуры отжига значения φ_{bn} , измеренные методом ВАХ, отличаются от измеренных другими методами из-за увеличения коэффициента идеальности n . На рис. 2, а представлены зависимости φ_b на образцах n - и p -типа электропроводности от температуры отжига для политипа 6H. Видно, что для барьеров, созданных и обработанных в одинаковых условиях, сохраняется соотношение $\varphi_{bn} + \varphi_{bp} \approx E_g$. На рис. 2, б показана зависимость φ_b от политипа для различных температур отжига. По оси абсцисс отложена степень гексагональности политипов (концентрация собственных вакансий растет с уменьшением степени гексагональности).

Как видно из рис. 2, б, для политипов 8H и 21R наиболее заметные изменения φ_{bn} происходят в диапазоне температур 373—473 К, тогда как для остальных политипов характерно равномерное изменение φ_{bn} во всем диапазоне температур отжига. Указанные политипы 8H и 21R характеризуются наиболее высокой концентрацией углеродных вакансий и наибольшим пинингом уровня Ферми на поверхности [5]. Взаимодействие поверхностных центров и гидроксильных групп (адсорбат) приводит к перезаполнению поверхностных состояний и еще большему сдвигу уровня Ферми. Поскольку значения φ_{bn} в этих поли-

типах действительно имеют наименьшую величину, то в соответствии с резонансным характером кислотно-основного взаимодействия энергия связи адсорбированных групп с поверхностными центрами должна быть меньше. Этими обстоятельствами скорее всего и объясняется резкое изменение φ_{bn} , наблюдаемое в этих поли типах при достаточно низких температурах отжига. Отсюда же можно сделать предположение, что φ_b на БШ, приготовленных без предварительного отжига при 700—800 К, определяется кислотно-основным взаимодействием гидроксильных групп и поверхностных центров, приводящих к перезаполнению поверхностных состояний и смещению уровня Ферми на поверхности вверх, ближе к зоне проводимости, и, следовательно, к уменьшению φ_{bn} . В процессе отжига готовых структур происходит термическое разложение комплексов поверхностный центр—ОН⁻ (дегидратация). В результате освобождения поверхностных состояний уровень Ферми снижается.

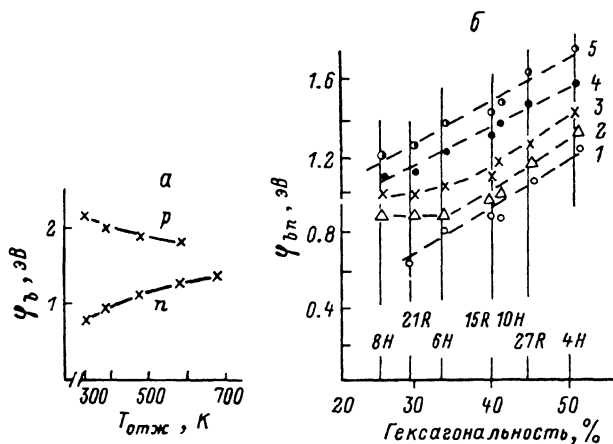


Рис. 2. Зависимость φ_b от температуры отжига для 6H-SiC (a) и высота барьера φ_{bn} некоторых политипов для различных температур отжига.

1—5 — то же, что и на рис. 1.

В процессе отжига готовых структур φ_{bn} не только достигает значений, которые были получены на структурах, сформированных после предварительного отжига в вакууме поверхности перед напылением Cr [5], но и превосходит эти значения, что может быть связано с влиянием Cr на происходящие при отжиге готовых структур процессы. Известно, что Cr является геттером для Si и процессы образования силицидов металлов происходят при довольно низких температурах. Такое поведение металлов наблюдается на поверхности Si [8, 9]. Если такое геттерирование атомов Si происходит на поверхности SiC, которая обогащена вакансиями углерода, то оно должно приводить к компенсационному действию, т. е. уменьшению плотности углеродных вакансий в приповерхностном слое и, как следствие, к дальнейшему понижению уровня Ферми.

В целом мы считаем, что наблюдаемые при отжигах готовых структур существенные изменения положения уровня Ферми на поверхности SiC (до 0.6 эВ) и, следовательно, перезаполнение поверхностных состояний прежде всего связаны с дегидратацией тонкого промежуточного слоя SiO₂ и границы раздела SiC—SiO₂, а также с изменением энергетической структуры поверхностных состояний, обусловленным возможным геттерированием атомов Si с поверхности SiC хромом при высоких температурах отжига (600—700 К).

Результаты исследований показали, что, варьируя выбор политипа и условия создания контактов, можно получить поверхностно-барьерные диоды Cr—SiC с высотой барьера от 0.8 до 2.2 эВ.

Л и т е р а т у р а

[1] Lindon L., Chye P. W., Garner C. M., Pianetta P., Su C. Y., Spicer W. E. — J. Vac. Sci. Techn., 1978, v. 15, N 4, p. 1332—1337.

- [2] Chye P. W., Lindon L., Pianetta P., Garner C. M., Su C. Y., Spicer W. E. — Phys. Rev., 1978, v. 18, N 10, p. 5545—5559.
 [3] Osbourn G. C., Smith D. L. — Phys. Rev., 1979, v. 19, N 4, p. 2124—2131.
 [4] Dow M. S., Smith D. L. — Phys. Rev., 1986, v. 20, N 12, p. 5150—5155.
 [5] Веренчикова Р. Г., Санкин В. И., Радованова Е. И. — ФТП, 1983, т. 17, в. 10, с. 1757—1760.
 [6] Лаухе Ю. — Автореф. канд. дис. Л., 1977.
 [7] Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. М., 1980. 483 с.
 [8] Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. М., 1986. 174 с.
 [9] Abolfotoh M. O., Tu K. N. — Phys. Rev., 1986, v. 33, N 10, p. 6572—6578.

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

Получено 25.05.1987
 Принято к печати 22.03.1988

ФТП, том 22, вып. 9, 1988

ИОНИЗАЦИЯ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Крючков С. В., Сыродоев Г. А.

Задача об ионизации связанного состояния (отрицательного иона, атома, примесного центра) полем световой волны решалась в ряде работ (см., например, [1, 2] и цитируемую там литературу). Для решения данной задачи в квазиклассическом приближении был разработан метод «мнимого времени» [3, 4], который затем [5] был обобщен на явления квантово-механического туннелирования через произвольный, зависящий от времени квазиклассический потенциалный барьер. Во всех перечисленных работах энергетический спектр вырванного полем электрона считался квадратичным. Вместе с тем в последнее время наметился прогресс в технологии получения полупроводниковых сверхрешеток (СР) [6, 7] — периодических структур с минизонным (неквадратичным) энергетическим спектром. В связи с увеличивающимся вниманием к СР [8] становится актуальной задача нахождения энергетических уровней и вероятностей распада примесных центров в полупроводниках с узкой зоной проводимости. В [9], например, найдены энергетический спектр и волновые функции короткодействующего примесного центра (КПЦ) в узкозонном полупроводнике в сильном постоянном электрическом поле и рассмотрено примесное поглощение света.

В настоящей работе произведен учет влияния конечной ширины зоны проводимости на поверхность ионизации КПЦ сильным переменным электрическим полем; показано также, что в СР вероятность ионизации обладает ярко выраженной анизотропией.

Энергетический спектр СР в одноминизонном приближении будем аппроксимировать зависимостью

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{2m_0} (p_y^2 + p_z^2) + \varepsilon_0 (1 - \cos p_x d), \quad (1)$$

где ε_0 — полуширина минизоны, d — постоянная СР, $\hbar=1$. Предполагается, что в начале координат помещен КПЦ с энергией связи $\bar{\varepsilon}$. Пусть к СР приложено переменное электрическое поле

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E} \cos \Omega t, \quad \mathbf{E} (E_0 \cos \alpha, E_0 \sin \alpha, 0).$$

Будем считать, что выполнены следующие условия:

$$\frac{\Omega}{\bar{\varepsilon}} \ll 1, \quad \frac{\Omega}{2\varepsilon_0} \ll 1, \quad \frac{eE_0 d}{\bar{\varepsilon}} \ll 1, \quad \frac{eE_0 d}{2\varepsilon_0} \ll 1, \quad (2)$$