

к зарядке состояний на МЗГ. Как первый, так и второй механизмы проводимости известны и могут реализовываться в полупроводниковых соединениях типа $A^{IV}B^{VI}$.

Следует отметить, что с увеличением концентрации окислителя в образцах характер температурного поведения темновой проводимости изменяется (см. рисунок, кривая 2) и в области высоких температур переходит к хорошо известной активационной зависимости, наблюдаемой в [2]. Это, безусловно, является следствием роста барьеров на МЗГ, что приводит к гашению надбарьерного эмиссионного тока или делает его несущественным по отношению к сквозному туннельному току основных носителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения / Под ред. Г. Харбеке. М., 1989.
- [2] Неустроев Л. Н., Осипов В. В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 2. С. 359—362.
- [3] Неустроев Л. Н., Осипов В. В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 59—72.
- [4] Seager C. H., Pike G. E. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 6. P. 471—474.
- [5] Зотов В. В. // Материалы научной конференции молодых ученых университета. Одесса, 1968. С. 236—238.

Научно-исследовательский институт физики
Одесского государственного университета
им. И. И. Мечникова

Получено 19.02.1991
Принято к печати 22.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ ИЗ СПЕКТРОВ ФОТОПРОВОДИМОСТИ

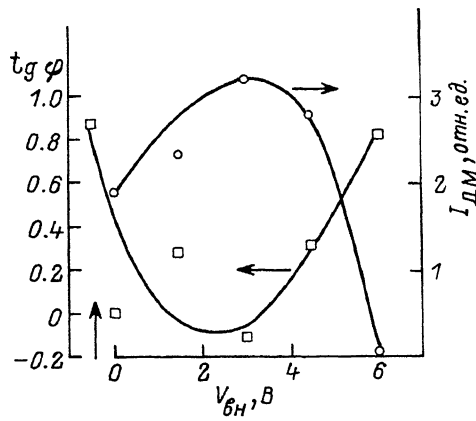
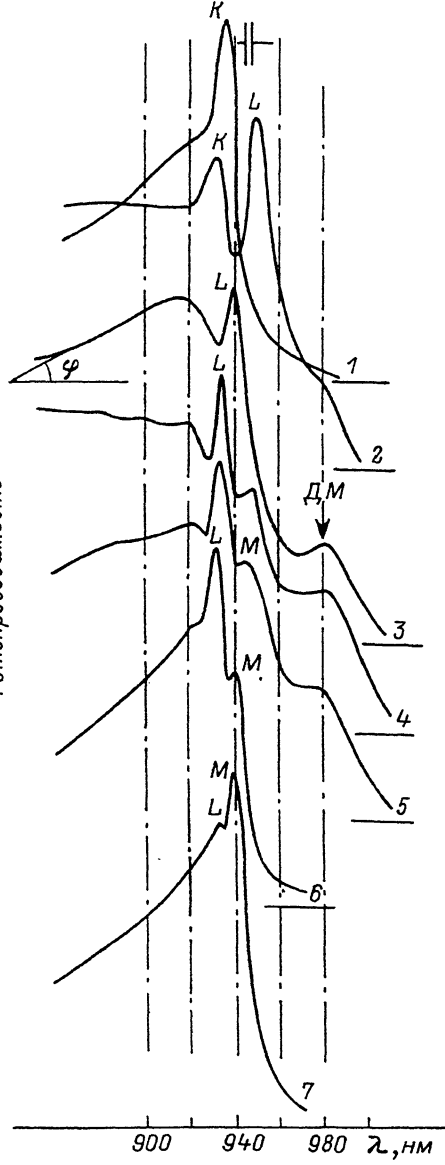
Арутюнян В. М., Варданян С. Х., Димаксян М. Л., Маргарян А. Л.,
Меликсетян В. А., Саруханян Р. Э.

В связи с более широким применением различного типа границ раздела (p — n -переход, гетеропереход, контакт полупроводника с металлом, диэлектриком, электролитом) идентификация и исследование роли поверхностных состояний в процессах, происходящих на этих границах, становятся все более актуальными [1,2]. Как было показано в [2-5], достаточно информативным в этом плане является исследование межфазной границы полупроводник—электролит, причем особо ценной в этом случае является возможность плавного изменения поверхностного потенциала (ПП).

В настоящей работе предложена методика, позволяющая проводить аналогичные исследования при низких температурах. Как и в [6,7], на хорошо отполированную поверхность образца наносится капля электролита, которая накрывается стеклянной пластиной. Однако в отличие от [6,7] в пластину вмонтирован металлический электрод, а полупроводник имеет тыловой омический контакт, к ним подключается внешний источник $V_{вн}$, с помощью которого осуществляется варьирование ПП. После установления стационарного состояния ячейка погружается в криостат и охлаждается до требуемой температуры. Для изменения значения ПП следует разморозить ячейку, изменить значение $V_{вн}$ и вновь охладить.

Отметим, что для ряда полупроводниковых материалов (например, CdTe, ZnO) контакт с электролитом приводит к возникновению на спектральных характеристиках особенностей, чувствительных к значению ПП [2-5]. В качестве материала для исследований нами был выбран монокристалл InSe, характеризую-

Фотопроводимость



Спектры фотопроводимости InSe при 78 K в сухом виде (1) и в контакте с 0.1 N KCl электродом при внешних смещениях.

$V_{вн}$, В: 2—0; 3—1.5; 4—3; 5—4.5; 6—6; 7—15. На вставке приведены зависимости интенсивности ДМ и тангенса угла наклона коротковолнового спада от $V_{вн}$. Стрелка на горизонтальной шкале соответствует результатам, полученным без контакта с электродом.

щийся сильной анизотропией свойств, а также интенсивными максимумами в области экситонного поглощения при низких температурах [8].

На рисунке показаны спектры фотопроводимости ($T = 78$ K), полученные как без контакта InSe с электродом, так и с использованием вышеописанной методики при варьировании $V_{вн}$ от 0 до +15 В (кривые 2—7). Как следует из рисунка, фотопроводимость, связанная с образованием и последующей диссоциацией экситонов, наблюдается как в отсутствие, так и при контакте образца с электродом. Однако в последнем случае наблюдается тонкая структура, очень чувствительная к значению ПП. С ростом $V_{вн}$ наблюдаемые линии сдвигаются в коротковолновую сторону.

ну. При достижении области межзонного поглощения самая коротковолновая линия K сливается с этой областью и доминирующей становится следующая линия L, которая, как и K, постепенно сливается с областью межзонного поглощения, уступая место линии M. При возбуждении объемного экситона изменение ПП приводит лишь к большей или меньшей вероятности диссоциации экситонов на свободные носители [9] и нет причин, приводящих к возникновению более одного максимума и их сдвигу. Следовательно, для объяснения наблюдавшихся закономерностей необходимо привлечь механизм закрепления экситонов на поверхности. В [4] было проведено детальное исследование спектров экситонного отражения от границы раздела ZnO—электрод. Показано, что с увеличением высоты и длины падения ПП находящаяся в области объемного энергетического спектра собственная двумерная поверхностная подзона (СДПП) поднимается в глубь запрещенной зоны, что приводит к плавному сдвигу линии, обусловленной связанным с этой СДПП экситоном. Поскольку возможно образование более одной СДПП и с каж-

дой из них может быть связан свой экситон, происходит формирование тонкой структуры, изменяющей свое местоположение в зависимости от ПП.

Рассмотренный механизм можно с успехом применить и для объяснения наблюдаемых в случае InSe особенностей. Сдвиг линий в коротковолновую сторону обусловлен тем, что в нашем случае с ростом $V_{\text{вн}}$ находящаяся у дна зоны проводимости E_c СДПП приближается к последней и сливается с ней, тогда как в [4] СДПП отщепляется от валентной зоны E_v .

Отметим, что наблюдающееся изменение интенсивности рассматриваемых линий обусловлено изменением плотности соответствующих поверхностных состояний при варьировании ПП [10].

Интересным, на наш взгляд, является возникновение при контакте с электролитом еще одного, более длинноволнового максимума (ДМ). Так как эта линия удалена от области экситонного поглощения и имеет отличную от экситонной форму, мы полагаем, что она обусловлена расположенными вблизи E_c поверхностными состояниями, сформировавшимися, по-видимому, в результате контакта полупроводника с электролитом [1]. При отсутствии или малых смещениях (кривые 2—5) в стационарном состоянии соответствующие уровни расположены ниже энергии Ферми E_F и, следовательно, заполнены электронами. При освещении полупроводника квантами света, достаточными для переходов электронов с этих уровней в зону проводимости, генерированные светом электроны увлекаются перпендикулярным к поверхности полем вглубь и могут принимать участие в фототоке, протекающем вдоль поверхности, ввиду сильной анизотропии подвижностей в InSe.

Как видно из рисунка, с ростом $V_{\text{вн}}$ интенсивность ДМ вначале возрастает из-за лучшего пространственного удаления фотоэлектрона от оставшейся на поверхности связанной дырки, а затем уменьшается и исчезает. Исчезновение ДМ происходит из-за резкого уменьшения заселенности рассматриваемых поверхностных уровней в тех стационарных состояниях, при которых E_F расположено ниже этих уровней. С другой стороны, при таких внешних смещениях наблюдается увеличение угла φ , характеризующего коротковолновый спад в области межзонного поглощения, что может быть обусловлено лишь резким увеличением скорости поверхностной рекомбинации. Обычно приповерхностное поле, способствующее лучшему пространственному разделению носителей, приводит к уменьшению роли поверхностной рекомбинации и соответственно к ослаблению коротковолнового спада. Действительно, в области малых $V_{\text{вн}}$ с их ростом коротковолновый спад ослабевает, однако при смещениях, соответствующих ослаблению интенсивности, ДМ вновь возникает и с дальнейшим ростом $V_{\text{вн}}$ начинает играть существенную роль.

Такое поведение можно объяснить лишь включением в процесс большого числа новых центров поверхностной рекомбинации. Действительно, поверхностные состояния, ответственные за ДМ, при больших внешних смещениях, находясь выше уровня Ферми, уже не будучи заселенными электронами, могут выступать в качестве эффективных центров поверхностной рекомбинации, что хорошо согласуется с синхронностью уменьшения интенсивности ДМ и роста угла φ (см. вставку на рисунке).

Таким образом, предложенный механизм в принципе объясняет наблюдающиеся закономерности, хотя и для их детального изучения и идентификации сформировавшихся состояний необходимы дальнейшие исследования.

Полученные результаты достаточно наглядно подтверждают высказанные в [1] представления о том, что межфазная граница является более упорядоченной системой, чем свободная поверхность. Действительно, как следует из вышеизложенного, в результате контакта полупроводника с электролитом формируются собственные поверхностные подзоны, очень чувствительные к состоянию поверхности.

В заключение следует отметить, что предлагаемая методика является удобной для детального анализа таких систем, поскольку позволяет исследовать процессы,

происходящие при освещении на межфазной границе раздела полупроводник—электродлит при низких температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Келдыш Л. В. // Природа. 1985. № 9. С. 17—33.
- [2] Арутюнян В. М. // УФН. 1987. Т. 158. В. 2. С. 255—291.
- [3] Паносян Ж. Р., Арутюнян В. М., Меликсетян В. А. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 9. С. 1633—1637.
- [4] Паносян Ж. Р., Касаманян З. А., Манляян А. Р. // Письма ЖЭТФ. 1985. Т. 41. В. 6. С. 251—254.
- [5] Harutunian V. M., Margarian H. L., Melicksetian V. A., Panossian J. R. // J. Phys. Condens. Matter. 1989. V. 1. N 5. P. 847—854.
- [6] Аснин В. М., Рогачев А. А., Степанов В. И., Чурилов А. Б. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. В. 6. С. 284—287.
- [7] Аснин В. М., Рогачев А. А., Степанов В. И., Чурилов А. Б. // ФТП. 1987. Т. 29. В. 6. С. 1713—1722.
- [8] Соболев В. В. // Зоны и экситоны халькогенидов галлия, индия и таллия. Кишинев, 1982. С. 171—193.
- [9] Арутюнян В. М., Маргарян А. Л., Меликсетян В. А. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 203—206.
- [10] Варданян А. А., Гаспарян В. М., Касаманян З. А. // Изв. вузов СССР. Физика. 1979. № 6. С. 123.

Ереванский государственный университет

Получено 10.06.1991

Принято к печати 22.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

АКЦЕПТОРНЫЕ УРОВНИ ЗАМЕЩАЮЩИХ АТОМОВ ПРИМЕСИ МЕДИ В КРИСТАЛЛАХ $Ge_{1-x}Si_x$

Аждаров Г. Х., Кязимзаде Р. З., Мир-Багиров В. В.

Медь как в германии, так и в кремнии относится к разряду глубоких примесных центров. Установлено, что замещающие атомы меди Cu_i в германии ведут себя как трехкратные акцепторы в соответствии с моделью тетраэдрических ковалентных связей. Энергетические уровни этих акцепторных состояний расположены в запрещенной зоне кристалла на расстояниях $E_v + 0.04$, $E_v + 0.33$ и $E_c - 0.26$ эВ [1]. В работе [2] приводятся косвенные доказательства того, что межузельные атомы меди Cu_i в германии являются мелкими донорами. Энергетические положения этих донорных состояний не определены, что связано с выпадением Cu_i в преципитаты в процессе закалки и их малой растворимостью. В кристаллах кремния, легированных медью, обнаруживаются два глубоких уровня: акцепторный $E_v + 0.49$ эВ и донорный $E_v + 0.24$ эВ [1,3]. Авторы [2] считают, что эти уровни относятся, скорее, к выпавшей в преципитаты меди, чем к растворенной. Результаты [2] косвенно свидетельствуют о донорном характере Cu_i и трехкратном акцепторном поведении Cu_i . Об энергетическом положении этих состояний в литературе сведений нет.

В настоящей работе представлены результаты исследований энергии активации ΔE акцепторных состояний Cu_i в твердых растворах $Ge_{1-x}Si_x$, направленных на установление закономерностей изменения ΔE с составом кристалла, а также на определение кратности возможных зарядов состояний Cu_i и их энергетических положений в кремнии.

Однородные кристаллы $Ge_{1-x}Si_x$ с содержанием Si до 30 ат% выращивались методом твердой подпитки расплава вторым компонентом (Si) и кристаллизацией из большого объема. Для исследования уровней Cu_i использовались кристаллы как с дырочной, так и электронной проводимостями с исходной эффективной концентрацией мелких акцепторных N_A и донорных N_D центров порядка $\sim 10^{14} + 10^{16}$ см⁻³. Легирование кристаллов $Ge_{1-x}Si_x$ медью производилось диффузионным