

©1995 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА РЕАЛЬНОЙ И СУЛЬФИДИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ GaAs

Е.Ф. Венгер, С.И. Кириллова, В.Е. Примаченко, В.А. Чернобай

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,
252650, Киев, Украина
(Получена 1 июня 1994 г. Принята к печати 22 июня 1994 г.)

Методом температурных и электрополевых зависимостей поверхностной фотоэдс исследованы электронные свойства поверхностей арсенида галлия *n*-типа (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As после стандартной их обработки, а также после сульфидирования в водном растворе $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. На реальных поверхностях обнаружены *N*-образные зависимости поверхностного потенциала φ_s при понижении температуры в пределах 300–100 К, что связано с заполнением поверхностных электронных состояний электронами и перестройкой самой системы этих состояний, вызывающей нарушение пиннинга уровня Ферми на поверхности. После сульфидирования GaAs зависимости $\varphi_s(T)$ изменяются. На состаренных сульфидированных поверхностях при понижении температуры не происходит перестройки спектра состояний и нарушения пиннинга уровня Ферми. При комнатной температуре на реальной и сульфидированной поверхностях получено *U*-подобное распределение плотности поверхностных состояний N_s по энергии в запрещенной зоне с минимумом вблизи положения уровня Ферми на поверхности. Сульфидирование уменьшает величину N_s в минимуме и смещает положение минимума ближе к валентной зоне. Исследован эффект фотопампяти потенциала φ_s , связанный с захватом дырок на поверхностные ловушки при освещении GaAs. Сульфидирование уменьшает концентрацию глубоких ловушек на обеих поверхностях GaAs.

Электронные свойства поверхности GaAs исследованы довольно хорошо, что нашло свое отражение в обзорах [1–3]. Важным параметром поверхности GaAs является величина поверхностного потенциала, которая, как показали многочисленные исследования, обусловлена закреплением (пиннингом) уровня Ферми на поверхности существующей системой поверхностных электронных состояний (ПЭС). Для объяснения пиннинга уровня Ферми были предложены различные модели: единая дефектная модель [4], модель эффективной работы выхода [5], модель ПЭС, введенных разупорядочением на межфазной границе с полупроводником [6,7].

Однако, как следует из ряда последних работ [8–13], параметры системы ПЭС можно изменять обработкой GaAs в водных растворах Na_2S или $(\text{NH}_4)_2\text{S}$, при которой происходит сульфидирование поверхности. Сульфидирование пассивирует поверхность GaAs, при этом изменяет

поверхностный потенциал, уменьшает плотность ПЭС вблизи середины запрещенной зоны, уменьшает скорость поверхностной рекомбинации, увеличивает интенсивность фотolumинесценции GaAs. Все это приводит к улучшению параметров полупроводниковых приборов на основе GaAs.

В данной работе на стандартно травленных (реальных) и сульфидированных поверхностях n -GaAs исследованы температурные зависимости поверхностного потенциала в области 300–100 К и его зависимости от внешнего электрического поля при комнатной температуре. Исследования позволили сделать принципиальный вывод, что система ПЭС на реальной поверхности перестраивается с изменением температуры, при этом нарушается пиннинг уровня Ферми. Сульфидирование поверхностей (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As по-разному изменяет перестройку спектра ПЭС с изменением температуры. Однако старение сульфидированных образцов приводит к стабилизации поверхностей (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As: спектр ПЭС на них с изменением температуры не перестраивается и не нарушается пиннинг уровня Ферми. Таким образом, в конечном итоге сульфидирование делает стабильным электронные свойства поверхностей GaAs при изменении температуры.

Из электрополевых зависимостей поверхностного потенциала на реальных и сульфидированных поверхностях получено U -образное распределение плотности ПЭС по энергии в запрещенной зоне. Энергетическое положение минимума плотности ПЭС практически совпадает с положением уровня Ферми на поверхности. На состаренных сульфидированных поверхностях минимальная величина плотности ПЭС в несколько раз меньше, чем на реальных поверхностях, причем ее энергетическое положение примерно на 0.3 эВ сдвинуто к валентной зоне. К сожалению, неравновесный эффект поля [14] и эффект фотопамяти поверхностного потенциала [15,16] не дали возможности получить распределение плотности ПЭС по энергии при низких температурах. Но исследование эффекта фотопамяти позволило определить концентрацию ловушек, захватывающих дырки при различных температурах, и показать, что концентрация глубоких ловушек уменьшается при сульфидировании поверхностей n -GaAs.

Методика эксперимента

В работе использовались образцы n -GaAs с концентрацией электронов $3.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, которая по данным исследования эффекта Холла в температурном интервале 300–100 К изменялась слабо, т.е. донорные состояния оставались практически полностью ионизированными. Размеры образцов составляли $1.5 \times 0.4 \times 0.05 \text{ см}^3$. Большие исследуемые грани образцов (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As шлифовали и затем полировали алмазными пастами. Для удаления механических структурных нарушений образцы травились в течение 2 мин в смеси растворов серной кислоты и перекиси водорода ($\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 1$). На концах образцов наносились контакты из индия. После исследования таких образцов со стандартно травленной (реальной) поверхностью проводилось их сульфидирование путем обработки в 0.1N водном растворе $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в течение 5 мин с последующей промывкой дистиллированной водой. Сульфидированные образцы исследовались сразу после обработки, а также после шести месяцев старения в естественных условиях.

Определение поверхностного потенциала φ_s (изгиба энергетических зон на поверхности) проводилось методом измерения поверхностной фотоэдс при большом уровне генерации электронно-дырочных пар в полупроводнике импульсом света лампы-вспышки ИСШ-100, спрямляющим в момент освещения зоны на поверхности полупроводника [17]. Для этого монтировался в криостате измерительный конденсатор, состоящий из слюды с напыленным полупрозрачным проводящим слоем SnO_2 и образца GaAs, прижатого одной из своих поверхностей к другой стороне слюды. Сигнал фотоэдс регистрировался на запоминающем осциллографе, что позволяло с учетом калибровочного коэффициента схемы определять величину потенциала φ_s . Температурные зависимости $\varphi_s(T)$ снимались в вакууме при остаточном давлении 10^{-4} Па при понижении температуры от 300 до 100 К. Немного ниже комнатной температуры обнаруживался эффект фотопамяти поверхностного потенциала [15,16]. Суть его заключается в том, что при освещении образца первым импульсом света с интенсивностью $\sim 10^{21}$ квант/см²·с происходит захват неосновных носителей заряда (дырок) на поверхностные ловушки, дающий изменение φ_s после воздействия импульса света. В результате с помощью второго или любого следующего импульса света измеряется уже измененное значение φ_{s2} , меньшее по абсолютной величине по сравнению со значением φ_{s1} , измеряемым с помощью первого импульса света. Разница $|\varphi_{s1} - \varphi_{s2}|$ определяет фотопамять поверхностного потенциала. В условиях эксперимента она обычно определялась при частоте следования импульсов света 1 Гц.

Отметим, что значение φ_{s2} , определенное с помощью второго импульса, равнялось значению, определенному с помощью третьего или любого следующего импульса света. Это свидетельствует о том, что захватывающие неравновесные дырки ловушки насыщаются ими уже при освещении первым импульсом света. Значение φ_{s1} , соответствующее находящемуся в темноте образцу, можно получить при определенной температуре лишь после освобождения ловушек от захваченных дырок, для чего необходимо выждать определенное время после предыдущего освещения образца или подогреть образец до температуры, при которой фотопамять не наблюдается. При понижении температуры время сохранения захваченного дырочного заряда в ловушках значительно возрастает (часы). Поэтому для корректного определения температурных зависимостей φ_{s1} и φ_{s2} каждый раз после измерений при определенной температуре производился отогрев образца до $T \gtrsim 300$ К с последующим охлаждением его в темноте до температуры нового измерения величин φ_s .

Отсутствие эффекта фотопамяти на поверхностях GaAs при комнатной температуре дает возможность исследовать зависимость поверхностного потенциала φ_s от внешнего электрического поля. Измерялось значение φ_s после приложения к измерительному конденсатору внешнего электрического напряжения V , изменяющегося в пределах $(-400) \div 400$ В. При этом исключалось возможное проявление неравновесности при напряжениях, обедняющих GaAs электронами [14]. Зависимости $\varphi_s(V)$ позволили рассчитать плотность ПЭС на реальных и сульфидированных поверхностях в энергетическом промежутке запрещенной зоны вблизи уровня Ферми на поверхности.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a* и *b* приведены температурные зависимости φ_{s1} для реальных (кривые 1), сульфидированных (кривые 2) и состаренных сульфидированных (кривые 3) поверхностей соответственно (111)Ga и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As. Здесь же даны зависимости φ_{s2} для реальных (кривые 1') и состаренных сульфидированных (кривые 3') поверхностей. Значения φ_{s1} и φ_{s2} — всегда отрицательные. Как показывают расчеты, это соответствует существованию в приповерхностных областях *n*-GaAs обедненных электронами слоев. При $T \lesssim 270$ К с появлением фотопамяти значения φ_{s2} , полученные с помощью второго светового импульса, по абсолютной величине меньше соответствующих значений φ_{s1} , что связано с уменьшением истощения после освещения первым импульсом света за счет захвата дырок на поверхностные ловушки.

Зависимости $\varphi_{s1}(T)$ для реальных поверхностей (111)Ga и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As имеют *N*-образный вид, отличающийся в низкотемпературной области. Сульфидирование, создающее более отрицательные значения поверхностного потенциала φ_{s1} , сильно изменяет зависимости $\varphi_{s1}(T)$ (кривые 2). Измененный *N*-образный вид $\varphi_{s1}(T)$ сохраняется лишь для поверхности $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As, а на поверхности (111)Ga зависимость $\varphi_{s1}(T)$ после сульфидирования приобретает *V*-образный вид, причем уменьшение $|\varphi_{s1}|$ с понижением температуры наблюдается лишь при $T \lesssim 120$ К. Старение сульфидированных поверхностей в естественных условиях, еще более увеличивая $|\varphi_{s1}|$, приводит к зависимостям $\varphi_{s1}(T)$, для которых с понижением температуры наблюдается лишь рост $|\varphi_{s1}|$ (рис. 1, *a, b*, кривые 3).

Рост $|\varphi_{s1}|$ с понижением температуры, характерный для кривых 3 во всей температурной области, для кривой 2 (рис. 1, *a*) в большей ее части и для остальных зависимостей вблизи комнатных и близких к ним температур, связан с заполнением электронами ПЭС вследствие сме-

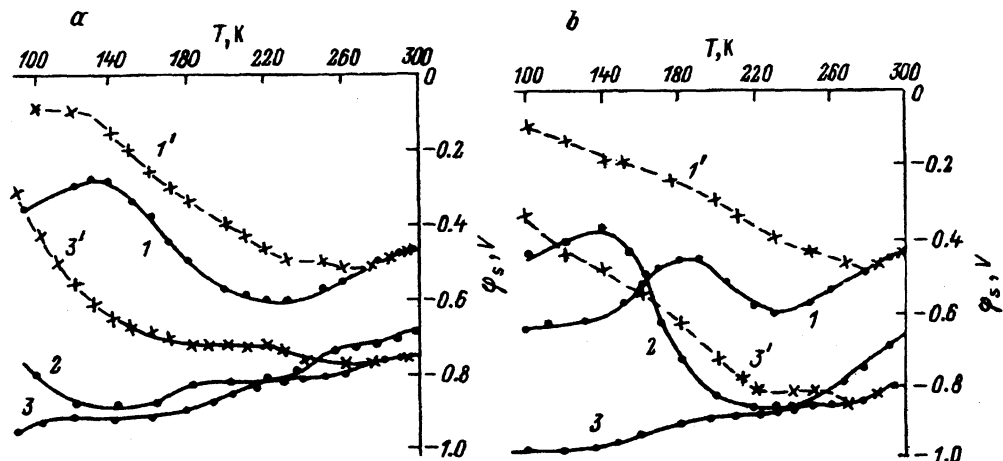


Рис. 1. Температурные зависимости поверхностного потенциала φ_s . Поверхности: *a* — (111)Ga, *b* — $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As. 1–3 — φ_{s1} , 1', 3' — φ_{s2} , определенные соответственно с помощью первого и второго импульсов света на реальной (1, 1'), сульфидированной (2) и состаренной сульфидированной (3, 3') поверхностях.

щения с понижением температуры уровня Ферми к зоне проводимости. Участки уменьшения $|\varphi_{s1}|$, наблюдающиеся с понижением температуры при более низких ее значениях, связаны с уменьшением отрицательного заряда в ПЭС, несмотря на дальнейшее смещение уровня Ферми в объеме полупроводника к зоне проводимости. Это может быть объяснено только в предположении, что с понижением температуры на поверхностях перестраивается сама система ПЭС. Подобное явление наблюдалось нами ранее при некоторых состояниях поверхностей германия [18,19], кремния [20,21], карбида кремния [22,23] и связывалось с обратимыми структурными изменениями на границе полупроводника с покрывающей его оксидной пленкой за счет напряжений, возникающих с изменением температуры. Обратимость и воспроизводимость зависимостей $\varphi_{s1}(T)$ подтвердили и контрольные измерения на обеих поверхностях GaAs до и после сульфидирования. Наблюдаемый *N*-образный вид зависимостей $\varphi_{s1}(T)$ на обеих поверхностях до сульфидирования и на поверхности $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As сразу после сульфидирования обусловлен конкуренцией механизмов зарядки ПЭС электронами и их перестройки при понижении температуры.

Определенному значению поверхностного потенциала φ_s соответствует заряд Q_{sv} в приповерхностной области GaAs, равный [16]

$$Q_{sv} = \sqrt{2}qn_iL \left[\lambda^{-1} \left(e^{\frac{q\varphi_s}{kT}} - 1 \right) + \lambda \left(e^{-\frac{q\varphi_s}{kT}} - 1 \right) + \frac{q\varphi_s}{kT} (\lambda - \lambda^{-1}) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $L = (\varepsilon kT/q^2 n_i)^{1/2}$, $\lambda = n_i/n$, n и n_i — соответственно объемные концентрации электронов при температуре T в исследуемом GaAs (определялась из измерений эффекта Холла) и в собственном GaAs (рассчитывалась с учетом температурной зависимости ширины запрещенной зоны [24]), ε — диэлектрическая проницаемость GaAs, q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана. Заряду Q_{sv} равен с обратным знаком суммарный заряд Q_s на ПЭС. Его зависимости от температуры (в единицах заряда электрона) для реальных и состаренных сульфидированных поверхностей (111) Ga и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As, рассчитанные по формуле (1) в соответствии с изменениями значений φ_{s1} , представлены на рис. 2.

Зависимости $Q_s(T)$ для реальных поверхностей, как и соответствующие зависимости $\varphi_{s1}(T)$ для них, имеют *N*-образный характер (кри-

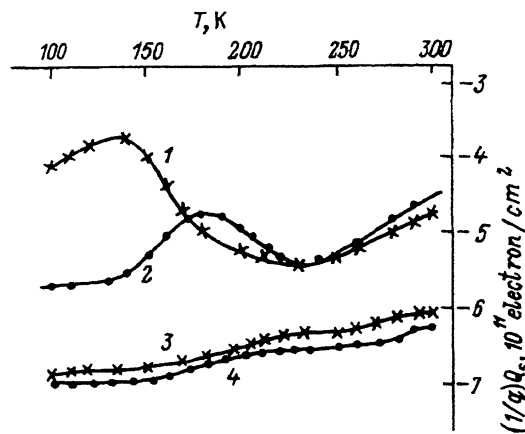


Рис. 2. Температурные зависимости заряда в ПЭС на реальных (1, 2) и состаренных сульфидированных (3, 4) поверхностях. Поверхности: 1, 3 — (111) Ga; 2, 4 — $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As.

вые 1 и 2 на рис. 2). Увеличение отрицательного заряда при понижении температуры до 240 К связано с зарядкой ПЭС электронами. При этом, как показывают расчеты, положение уровня Ферми на поверхности слабо изменяется вблизи середины запрещенной зоны E_i , т.е. наблюдается его пиннинг ввиду большой концентрации ПЭС. При $T < 230$ К с понижением температуры наблюдаются участки уменьшения отрицательного заряда Q_s в ПЭС, что может быть обусловлено только перестройкой системы ПЭС, при которой уменьшается плотность ПЭС, находящихся ниже уровня Ферми на поверхности, или возрастает плотность положительно заряженных ПЭС, находящихся выше уровня Ферми. Изменения в системе ПЭС приводят к нарушению закрепленности уровня Ферми на поверхности: вначале с понижением температуры он смещается выше E_i , затем при переходе значений $|Q_s|$ через минимум вновь приближается к E_i . Максимальное смещение уровня Ферми вверх от E_i на поверхности (111)Ga составляет 0.4 эВ, а на поверхности ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As — 0.18 эВ. Оно наблюдается соответственно при температурах 130 и 180 К.

Перестройку системы ПЭС и связанное с ней нарушение пиннинга уровня Ферми можно понять, принимая во внимание природу происхождения ПЭС. Она связана с разупорядочением, существующим на границе раздела полупроводник-окисная пленка, что приводит к случайному распределению значений локального потенциала межфазных ячеек полупроводника и окисла, формирующему U -образное распределение плотности ПЭС в запрещенной зоне полупроводника [6,7,25,26]. Разупорядоченность может быть различной природы, в частности причиной ее может быть вариация длин и углов связи в межфазных ячейках [6,7,26]. На германии и кремнии степень разупорядоченности может быть относительно невелика, что приводит к относительно небольшой минимальной плотности ПЭС ($10^{10} \div 10^{11}$ см $^{-2}$ ·эВ $^{-1}$), дающей возможность изменять положение уровня Ферми на поверхности с помощью различных ее обработок или изменения температуры [18–21]. В сложных полупроводниках, в частности в GaAs, степень разупорядоченности больше и может охватывать более толстый межфазный слой, что приводит к большей плотности ПЭС и пиннингу уровня Ферми на поверхности [2,6,7].

Такой пиннинг уровня Ферми мы наблюдаем на реальных поверхностях GaAs в температурном интервале 300–240 К. Нарушение пиннинга при $T < 230$ К связано с перестройкой системы ПЭС вследствие механических напряжений, возникающих на межфазной границе при изменении температуры. Напряжения приводят к изменению степени разупорядочения, например, за счет изменения длин и углов связи в межфазных ячейках полупроводника и окисла, что формирует измененную систему ПЭС. N -образный вид зависимостей $Q_s(T)$ (рис. 2, кривые 1, 2) вызван конкуренцией двух механизмов изменения заряда в ПЭС — заполнением ПЭС электронами и перестройкой системы ПЭС. В области $T \gtrsim 180$ К зависимости $Q_s(T)$ для поверхностей (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As практически совпадают, однако при $T < 180$ К между ними имеется существенное отличие. На поверхности (111)Ga перестройка ПЭС более существенна, чем на поверхности ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As, и происходит в более широком диапазоне при понижении температуры. Это связано с различным характером окисных пленок на поверхностях (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As

и различным переходным слоем между ними и собственно поверхностями GaAs, состоящими соответственно из атомов Ga и As. Действительно, известно [27], что ввиду большей электроотрицательности атомов As по сравнению с атомами Ga и перетягиванию электронной плотности к первым, поверхность $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ более активна, быстрее травится и окисляется, чем поверхность $(111)\text{Ga}$, что приводит к различному характеру оксидных пленок на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$. Разное будет и строение переходных слоев между плоскостями, состоящими лишь из атомов Ga или As, и покрывающими их оксидными пленками. Поэтому упругие напряжения, возникающие при понижении температуры на межфазной границе GaAs-(окисная пленка), будут приводить на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ к разным изменениям системы ПЭС.

При обработке GaAs в сульфидных растворах окисные пленки разрушаются, и на его поверхностях осаждается сера с образованием связей Ga-S и As-S, что подтверждают исследования фотоэлектронной спектроскопии [13,28]. Образование новой межфазной границы на поверхности GaAs приводит к формированию новой системы ПЭС, что более сдвигает поверхностный потенциал в отрицательную сторону и изменяет его температурные зависимости (рис. 1, *a, b*, кривые 2). Отличие характера зависимостей $\varphi_{s1}(T)$ на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ сразу после сульфидирования, по нашему мнению, связано с тем, что на поверхности $(111)\text{Ga}$ формируются предпочтительно связи Ga-S, в то время как на поверхности $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ вначале преобладают связи As-S [28]. Как показывают расчеты [29], для установления более прочных связей Ga-S на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ требуется стимуляция типа подогрева или облучения [12,13,28]. Мы полагаем, что к установлению прочных связей Ga-S на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ приводит и длительная выдержка (старение) сульфидированных поверхностей в естественных условиях. В результате формируются стабильные поверхности $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$, на которых с изменением температуры перестройка спектра ПЭС не происходит (рис. 1, *a, b*, кривые 3). Отметим, что изменение свойств сульфидированных поверхностей при старении не связано с процессом их окисления, которому препятствуют сульфидные пленки. Об этом свидетельствуют результаты работы [11], где показано, что при окислении реальной поверхности GaAs в ходе старения абсолютная величина поверхностного потенциала уменьшается. У нас, напротив на сульфидированных поверхностях при старении значения $|\varphi_{s1}|$ возрастают.

Расчитанные по формуле (1) зависимости заряда в ПЭС от температуры на состаренных сульфидированных поверхностях представлены на рис. 2 (кривые 3,4). Видно, что заряды в ПЭС на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ примерно равны и одинаковым образом изменяются с температурой, несколько возрастают по абсолютной величине за счет зарядки ПЭС электронами. При этом расчеты показывают, что уровень Ферми на поверхностях $(111)\text{Ga}$ и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})\text{As}$ остается практически закрепленным соответственно при значениях 0.23 и 0.28 эВ ниже середины запрещенной зоны E_i .

Как уже отмечалось, отсутствие эффекта фотопамати при комнатной температуре позволило исследовать зависимость поверхностного

потенциала φ_s от электрического напряжения V , прикладываемого к измерительному конденсатору с удельной емкостью C_g , которая была порядка 100 пФ/см^2 . По полученным зависимостям $\varphi_s(V)$ можно рассчитать плотность ПЭС при различных φ_s согласно формуле [30]

$$N_s(\varphi_s) = \frac{1}{q} \left[C_g \left(\frac{dV}{d\varphi_s} - 1 \right) - \frac{dQ_{sv}}{d\varphi_s} \right]. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что каждому значению φ_s соответствует определенное положение уровня Ферми на поверхности, можно от зависимостей $N_s(\varphi_s)$ перейти к зависимостям $N_s(E)$ [16], где E — значение энергии в запрещенной зоне на поверхности GaAs относительно ее середины E_i . Зависимости $N_s(E)$ для реальных (кривые 1, 2) и состаренных сульфидированных (кривые 3, 4) поверхностей GaAs приведены на рис. 3. Видно, что все зависимости имеют непрерывное U -образное распределение ПЭС по энергии. Концентрация ПЭС на поверхностях (111)Ga несколько больше, чем на поверхностях $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As. Минимальные значения концентраций находятся при энергии E , примерно совпадающей с положением уровня Ферми на соответствующих поверхностях. Этот факт, отмеченный в работе [7], вместе с U -образным характером $N_s(E)$ еще раз подтверждает, что природа ПЭС вызвана разупорядочением на межфазной границе полупроводника с покрывающей его окисной или сульфидной пленкой.

На сульфидированных поверхностях реальная сложная по составу аморфная окисная пленка заменена сульфидной пленкой с атомами серы, сидящими поверх атомов галлия на поверхности (111)Ga, и атомами серы, замещающими атомы мышьяка (и таким образом связанными с тремя атомами галлия) на поверхности $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As. Эти результаты были получены в работе [12] методом стоячей рентгеновской волны. Энергии связи атомов серы с атомами галлия на поверхностях (111)Ga и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As составляют соответственно 4.3 и 6.1 эВ [12, 29]. Таким образом, степень разупорядоченности на межфазной границе GaAs-пленка при

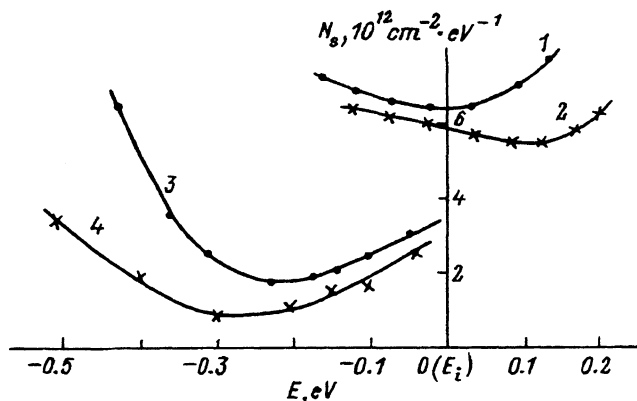


Рис. 3. Распределение концентрации ПЭС N_s вблизи середины запрещенной зоны E_i на реальных (1, 2) и состаренных сульфидированных (3, 4) поверхностях. Поверхности: 1, 3 — (111)Ga; 2, 4 — $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ As.

замене окисной пленки сульфидной существенно уменьшается по крайней мере со стороны пленки. Это должно привести, согласно работам [7,25,26], к уменьшению плотности ПЭС на сульфидированных поверхностях по сравнению с реальными поверхностями, что и следует из наших исследований (рис. 3). Минимальная плотность ПЭС на реальных поверхностях составляет $(5.5 \div 6.5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, а на сульфидированных — $(0.8 \div 1.7) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$.

Несмотря на уменьшение плотности ПЭС на сульфидированных поверхностях, их концентрация все же остается достаточно высокой для того, чтобы обеспечить закрепление уровня Ферми на поверхности при изменении температуры в пределах 300–100 К. В то же время более высокая концентрация ПЭС на реальных поверхностях, как показывают наши результаты, обеспечить такой закрепленности уровня Ферми не может, так как перестраивается сама система ПЭС за счет структурных изменений, возникающих на межфазной границе окисел–GaAs при изменении температуры. На поверхностях GaAs со стабилизированной близкой к монослойной сульфидной пленкой при изменении температуры системы ПЭС не изменяется. Это связано с тем, что не происходят структурные изменения на межфазной границе сульфидная пленка–GaAs из-за установления прочных связей атомов серы с атомами галлия.

Перейдем к рассмотрению эффекта фотопамяти поверхностного потенциала. Как отмечалось, на рис. 1, *a, b* кривыми 1' и 3' обозначены значения потенциала φ_{s2} , полученные соответственно на реальных и состаренных сульфидированных поверхностях с помощью второго импульса света. Рост $|\varphi_{s2}|$ с понижением температуры наблюдается на участках, где фотопамяти еще нет, т.е. $\varphi_{s1} = \varphi_{s2}$. С появлением фотопамяти, определенной как разность $|\varphi_{s1} - \varphi_{s2}|$, значения $|\varphi_{s2}|$ уменьшаются с понижением температуры, что свидетельствует об увеличении с понижением температуры количества дырок, захватываемых на поверхностные ловушки.

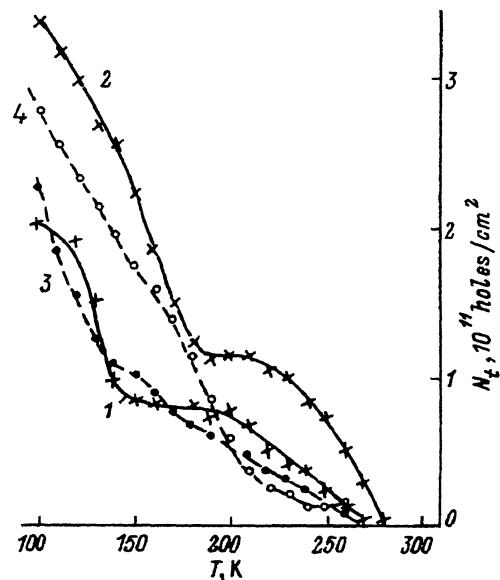


Рис. 4. Температурные зависимости концентрации дырок N_t , захватываемых на ловушки реальных (1, 2) и состаренных сульфидированных (3, 4) поверхностей. Поверхности: 1, 3 — (111)Ga; 2, 4 — (111)As.

Количество захватываемых на ловушки дырок, согласно изложенному, при определенной температуре равно

$$N_t = 1/q[Q_{sv}(\varphi_{s1}) - Q_{sv}(\varphi_{s2})]. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены рассчитанные температурные зависимости $N_t(T)$ для реальных (кривые 1 и 2) и состаренных сульфидированных (кривые 3 и 4) поверхностей (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As. Видно, что захват дырок начинается при $T \approx 280-270$ К. Количество захватываемых дырок N_t с понижением температуры растет на всех поверхностях. В условиях насыщаемости ловушек дырками во время действия первого импульса света это свидетельствует о том, что с понижением температуры растет и концентрация ловушек, захватывающих дырки. Это связано с тем, что в захвате дырок принимают участие ловушки, расположенные на различном энергетическом расстоянии от верха валентной зоны, и при понижении температуры захваченный в ловушки дырочный заряд начинает сохраняться во все более близко расположенных к валентной зоне ловушках за счет увеличения времени обратного выброса дырок в валентную зону.

Как видно из рис. 4, концентрация захватываемых дырок и, следовательно, концентрация ловушек, при определенной температуре больше на реальной поверхности ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As по сравнению с поверхностью (111)Ga. В области температур 220–190 К для поверхности ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As и 200–150 К для поверхности (111)Ga на кривых 1 и 2 имеются полочки. Это позволяет сделать вывод, что на реальных поверхностях имеются две группы ловушек: более глубокие, определяющие захват дырок при более высоких температурах, и более мелкие, расположенные ближе к валентной зоне, которые определяют захват дырок при более низких температурах. Концентрация глубоких ловушек на реальных поверхностях (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As составляет соответственно $8 \cdot 10^{10}$ и $1.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

На сульфидированных поверхностях (111)Ga и ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As (кривые 3 и 4 соответственно) концентрация глубоких ловушек уменьшается по сравнению с реальными поверхностями. Особенно сильно уменьшается концентрация глубоких ловушек на сульфидированной поверхности ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)As. Второй особенностью зависимостей $N_t(T)$ на сульфидированных поверхностях является отсутствие полочек, т.е. четких температурных границ проявления глубоких и мелких ловушек. Уменьшение концентрации глубоких ловушек и концентрации ПЭС при сульфидировании поверхностей GaAs дает основание предположить, что природа происхождения ловушек и ПЭС одинаковая, и ловушки отличаются от ПЭС только большим сечением захвата дырок.

Список литературы

- [1] Н.Л. Дмитрук. Изв. вузов СССР. Физика, вып. 1, 38 (1980).
- [2] Н.Л. Дмитрук., О.И. Маева. Оптоэлектрон. полупр. техника, вып. 17, 29 (1990).
- [3] В.И. Белый, В.Р. Белослудов. В кн.: *Современные проблемы физической химии поверхности полупроводников* (Новосибирск, 1988).
- [4] W.E. Spicer, P.W. Chye, P.R. Skeath, C.Y. Su, I. Lindau. J. Vac. Sci. Technol., 16, 1422 (1979).
- [5] J.L. Freeouf, J.M. Woodall. Appl. Phys. Lett., 39, 727 (1981).

- [6] H. Hasegawa, T. Sawada. *Thin Sol. Films*, **103**, 119 (1983).
- [7] H. Hasegawa, H. Ohno. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **4**, 1130 (1986).
- [8] C.J. Sandroff, R.N. Nottenbure, J.C. Bischoff, R. Bhat. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 33 (1987).
- [9] R. Iyer, R.R. Chang, D.L. Lile. *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 134 (1988).
- [10] В.Л. Берковиц, В.Н. Бессолов, Т.В. Львова, Е.Б. Новиков, В.И. Сафаров, Р.В. Хасиева, Б.В. Царенков. *ФТП*, **25**, 1406 (1991).
- [11] Б.И. Бедный, Н.В. Байдусь, Т.В. Белич, И.А. Карпович. *ФТП*, **26**, 1383 (1992).
- [12] M. Sugiyama, S. Maeyama, M. Oshima, H. Oigawa, Y. Nannichi, H. Hashizuma. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 3247 (1992).
- [13] A.S. Weling, K.K. Kamath, P.R. Vaya. *Thin Sol. Films*, **215**, 179 (1992).
- [14] V.E. Primachenko, O.V. Snitko, V.V. Milenin. *Phys. St. Sol.*, **11**, 711 (1965).
- [15] Н.Л. Дмитрук, В.И. Ляшенко, А.К. Терещенко. *УФЖ*, **17**, 1356 (1972).
- [16] В.Е. Примаченко, О.В. Снитко. *Физика легированной металлами поверхности полупроводников* (Киев, 1988).
- [17] А.В. Саченко, О.В. Снитко. *Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников* (Киев, 1984).
- [18] С.И. Кириллова, В.Е. Примаченко, О.В. Снитко, В.А. Чернобай. *Поверхность*, вып. 12, 85 (1990).
- [19] С.И. Кириллова, В.Е. Примаченко, О.В. Снитко, В.А. Чернобай. *Оптоэлектрон. полупр. техника*, вып. 20, 15 (1991).
- [20] С.И. Кириллова, В.Е. Примаченко, В.А. Чернобай, О.В. Снитко. *Поверхность*, вып. 11, 74 (1991).
- [21] С.И. Кириллова, В.Е. Примаченко, Г.Ф. Романова, П.И. Диденко, В.А. Чернобай. *Микроэлектроника*, **22**, вып. 3, 51 (1993).
- [22] С.Ф. Авраменко, Е.Ф. Венгер, С.И. Кириллова, В.С. Киселев, В.Е. Примаченко, О.Т. Сергеев, В.А. Чернобай. *УФЖ*, **38**, 268 (1993).
- [23] С.Ф. Авраменко, Е.Ф. Венгер, С.И. Кириллова, В.С. Киселев, В.Е. Примаченко, О.Т. Сергеев, В.А. Чернобай. *Поверхность*, вып. 6, 89 (1993).
- [24] K.P. O'Donnell, X. Chen. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2924, (1991).
- [25] В.Н. Овсяк, А.В. Ржанов. *ФТП*, **3**, 294 (1969).
- [26] Ю.А. Зарифьянц, В.Ф. Киселев, С.Н. Козлов, Ю.Ф. Новотоцкий-Власов. *Вестн. МГУ. Физика*, № 1, 84 (1975).
- [27] K. Хилсум, А. Роуз-Инс. *Полупроводники типа A^3B^5* (М., 1963).
- [28] T. Scimeca, Y. Muramatsu, M. Oshima, H. Oigawa, Y. Nannichi. *Phys. Rev. B*, **44**, 12927 (1991).
- [29] T. Ohno. *Phys. Rev. B*, **44**, 6306 (1991).
- [30] Y.W. Lam. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **4**, 1370 (1971).

Редактор Л.В. Шаронова

Electron properties of real and sulphurized surfaces of GaAs

E.F. Venger, S.I. Kirillova, V.E. Primanchenko, V.A. Chernobay

Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Sciences, 252650, Kiev, Ukraine