

ELECTRON TRAPS ON SEMICONDUCTOR SURFACES

B. I. BEDNYI

Localized electron states arise on the free surfaces interfaces of semiconductors. These states are the traps for electrons and holes. Surface traps cause considerable changes in the electric and optical properties of semiconductors. Some physical effects related to the trapping of charge carriers by the surface and affecting the characteristics of electron devices are considered.

На свободной поверхности и границах раздела полупроводников возникают локализованные электронные состояния – ловушки электронов и дырок. Поверхностные ловушки существенно изменяют электрические и оптические свойства полупроводников. Рассмотрены некоторые физические эффекты, связанные с захватом носителей заряда на поверхность и влияющие на характеристики полупроводниковых приборов.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛОВУШКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Б. И. БЕДНЫЙ

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

ВВЕДЕНИЕ

Электронные процессы, протекающие вблизи свободной поверхности и границ полупроводников с металлами, диэлектриками или другими полупроводниками, привлекают пристальное и неослабевающее внимание исследователей уже на протяжении 50 лет – с момента зарождения полупроводниковой электроники. Отсчет полупроводниковой эры принято вести от 1948 года, когда американские физики Дж. Бардин, У. Браттейн и У. Шокли опубликовали уникальное изобретение века – биполярный транзистор. В 1956 году за это изобретение им была присуждена Нобелевская премия.

Интерес к приповерхностным электронным процессам обусловлен важной особенностью полупроводниковых материалов, о которой, к сожалению, не упоминается в школьных учебниках физики, – существенным влиянием строения, электронного состояния и способов обработки поверхности на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства полупроводников.

Основная причина повышенной чувствительности полупроводника к состоянию поверхности состоит в том, что в ограниченном кристалле возникают особые энергетические уровни, локализованные непосредственно у поверхности и играющие роль ловушек электронов и дырок. Наличие таких ловушек приводит к тому, что свободно блуждающие в объеме кристалла электроны и дырки прилипают к поверхности, образуя поверхностный электростатический заряд. С этим зарядом связано обычно сильное ($\sim 10^5$ В/см) электрическое поле, проникающее на некоторую глубину в объем полупроводника и кардинально изменяющее условия жизни носителей заряда, что проявляется во многих физических явлениях (электропроводность, работа выхода, фотоэффекты, люминесценция, контактные явления и др.). В прикладном отношении особенно важно то, что поверхностные ловушки во многих случаях ответственны за нежелательные изменения характеристик и нестабильность параметров полупроводниковых приборов [1].

К числу важных технологических факторов, стимулирующих развитие исследований поверхности и границ раздела полупроводников, относится общая

тенденция микроэлектроники к миниатюризации приборов и элементов интегральных схем. По мере уменьшения размера L активного слоя в полупроводниковом приборе объем этого слоя уменьшается пропорционально L^3 , а поверхность — пропорционально L^2 . Это, естественно, приводит к увеличению “веса” поверхности (отношение поверхность/объем возрастает пропорционально L^{-1}) и ее влияния на объемные процессы.

Кроме того, атомарно-чистые поверхности и резкие границы раздела применяются при создании искусственных полупроводниковых микроструктур, в которых используются электронные явления в сверхтонких (квантоворазмерных) слоях и с которыми связано новое и чрезвычайно перспективное направление развития полупроводниковой электроники — нанотехнология [2].

В рамках журнальной статьи трудно охватить весь спектр проблем, стоящих перед современной физикой и технологией поверхности полупроводников. Остановимся лишь на наиболее важных с физической точки зрения вопросах, касающихся природы поверхностных ловушек и приповерхностных потенциальных барьеров, рассмотрим некоторые поверхностные эффекты, имеющие непосредственное отношение к работе полупроводниковых приборов, и, наконец, кратко обсудим современное состояние проблемы пассивации поверхности, которая оказалась камнем преткновения для технологий, занимающихся разработкой и изготовлением сверхскоростных и оптоэлектронных приборов [3].

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ

При дальнейшем изложении материала будем исходить из того, что читатель знаком с понятием об энергетических уровнях в запрещенной зоне полупроводника. Напомним лишь, что эти уровни отражают энергетические состояния электронов, пространственно локализованных вблизи различного рода структурных нарушений внутри периодической решетки полупроводника (атомные вакансии, межузельные атомы, примеси и др.). Поскольку на поверхности кристалла резко обрывается существующий в его объеме строгий порядок в расположении атомов и, кроме того, коренным образом изменяются условия для формирования химических связей (хотя бы вследствие очевидной причины — изменения числа ближайших соседей), следует ожидать появления в запрещенной зоне дополнительных поверхностных энергетических уровней. Эти уровни, которые обычно называют поверхностными состояниями (ПС), можно качественно интерпретировать как оборванные связи или ненасыщенные (болтающиеся) валентности поверхностных атомов. Поэтому концентрация ПС N_{ss} по порядку величины должна соответствовать поверхностной плотности атомов твердого тела, то есть $N_{ss} \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

До сих пор мы имели в виду модель идеальной поверхности — геометрическую плоскость, на которой атомы или ионы расположены так же, как и на соответствующих кристаллографических плоскостях внутри кристалла. Реальная ситуация на поверхности полупроводника оказывается намного сложнее [3–5]. Выделим наиболее существенные дополнительные факторы, которые необходимо принимать во внимание при анализе причин возникновения ПС.

1. Даже на атомарно чистых поверхностях, полученных в условиях сверхвысокого вакуума с помощью специальной техники скалывания кристалла или с применением сложных методов очистки (например, ионная бомбардировка + термообработка), наблюдаются признаки нарушения порядка: поверхностные атомы претерпевают относительно большие смещения от их положений, соответствующих объему полупроводника.

2. При подготовке полупроводниковых пластин к изготовлению прибора или проведению лабораторных исследований кристалл подвергается механической (резка, шлифовка, полировка) и химической обработке (стравливание нарушенного слоя, очистка). Эти операции в той или иной степени оставляют следы на поверхности в виде адсорбированных примесей и структурного разупорядочения.

3. В обычных условиях полупроводник находится в контакте с окружающей средой, что приводит к образованию покровной оксидной пленки толщиной до 3–4 нм и осаждению на внешней поверхности этой пленки кислорода, углерода, паров воды и других примесей.

4. Поверхностные дефекты и адсорбированные атомы могут обмениваться электронами с полупроводником, выступая в роли донорных или акцепторных поверхностных ловушек. Появление донорных центров соответствует ситуации, когда дефектам или адсорбированным атомам энергетически выгодно отдавать электроны полупроводнику или захватывать дырки из полупроводника. При этом они превращаются в положительно заряженные ионы. Акцепторные центры захватывают электроны из объема полупроводника, и поверхность заряжается отрицательно.

Учитывая сказанное, видим, что реальная поверхность в микроскопическом смысле представляет собой тонкую, но все же трехмерную переходную область, отделяющую объем полупроводника от окружающей среды. Эта область отличается особым химическим составом и повышенным содержанием неконтролируемых примесей и структурных дефектов, которые и являются основными источниками возникновения электронных ловушек. Таким образом, сохранение за этими ловушками названия “поверхностные” в значительной степени условное.

Заметим, что адсорбционные и окислительные процессы приводят к уменьшению числа оборванных связей на поверхности. Поэтому поверхностная концентрация ловушек вблизи границы раздела полупроводник—оксид оказывается значительно меньше, чем плотность поверхностных атомов полупроводника (на реальной поверхности $N_{ss} \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Вместе с тем во многих случаях для практического применения в приборах требуется, чтобы число дефектов на границе раздела не превышало $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (один дефект на 100 000 поверхностных атомов). К сожалению, до настоящего времени эта проблема для большинства полупроводниковых материалов не решена. Уникальным исключением является создание практически бездефектной границы Si—SiO₂. Это обстоятельство во многом способствовало развитию кремниевой технологии и промышленному использованию Si в качестве основного материала электронной техники [4].

ПРИПОВЕРХНОСТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР И ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК

Знак заряда, захваченного на поверхностные ловушки, Q_{ss} зависит, с одной стороны, от того, какой тип ловушек — донорный или акцепторный — преобладает и, с другой — от соотношения между концентрациями электронов n_0 и дырок p_0 в объеме полупроводника. Во многих практически важных случаях на поверхности присутствуют и донорные и акцепторные ловушки в приблизительно равных и достаточно высоких концентрациях. В связи с этим знак Q_{ss} обычно совпадает со знаком основных носителей тока в объеме.

Рассмотрим для определенности полупроводник n -типа, достаточно сильно легированный донорной примесью, так что в его объеме выполняется условие $n_0 \gg p_0$. В этом случае локальная электрическая нейтральность в объеме полупроводника обеспечивается приближенным равенством $n_0 \approx N_D^+$ (каждый донор выбрасывает один электрон в зону проводимости полупроводника). Захват свободных электронов на поверхностные ловушки приводит к образованию поверхностного заряда $Q_{ss} < 0$ и равного ему по величине положительного объемного заряда, связанного с нескомпенсированными донорами $Q_{sc} = N_D^+ w$, где w — ширина приповерхностной области пространственного заряда. Таким образом, вблизи поверхности возникает двойной заряженный слой, поле которого будет отталкивать электроны в глубь кристалла. На энергетической диаграмме (рис. 1, а) это отображается в виде изгиба зон, которому соответствует приповерхностный потенциальный барьер U_s , затрудняющий движение электронов по направлению к поверхности. Согласно теории [1], при наличии поверхностного барьера концентрация свободных

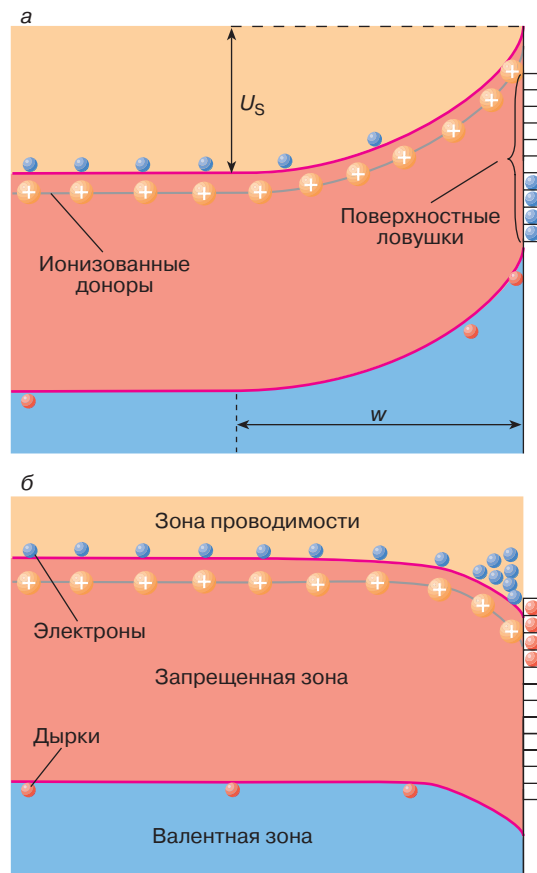


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы полупроводника при наличии обедненного (а) и обогащенного (б) слоя вблизи поверхности

электронов у поверхности n_s экспоненциально уменьшается:

$$n_s \approx n_0 \exp \left(-\frac{U_s}{kT} \right), \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура. Достаточно типична ситуация, когда $U_s \sim \Delta E_g / 2 \sim 0,5 - 0,7$ эВ, где ΔE_g — ширина запрещенной зоны (энергия высвобождения валентных электронов в атомах решетки полупроводника). В соответствии с (1) это означает, что концентрация электронов вблизи поверхности уменьшается в $10^8 - 10^{10}$ раз.

Таким образом, обедненный электронами приповерхностный слой по сравнению с объемом полупроводника имеет гораздо большее удельное сопротивление и играет роль изолирующей прослойки между поверхностью и объемом. Отметим, что ширина этого слоя w зависит от концентрации легирующей примеси и высоты барьера [1]

$$w \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon U_s}{q^2 N_D^+}}. \quad (2)$$

Эта зависимость может быть использована для управления электропроводностью полупроводниковых пленок, если толщина пленки d соизмерима с w (например, при увеличении N_D^+ в практически интересном интервале $10^{14}–10^{19} \text{ см}^{-3}$ ширина обедненного слоя уменьшается от единиц до сотых долей микрометра).

Эффективным способом уменьшения высоты барьера является подсветка полупроводника электромагнитным излучением оптического диапазона из области собственного поглощения (энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны полупроводника). В этом случае возникающие вследствие фотоионизации атомов полупроводника дополнительные электроны и дырки пространственно разделяются в электрическом поле обедненного слоя, как показано на рис. 2: дырки “прижимаются” к поверхности и захватываются на поверхностные ловушки, уменьшая величину поверхностного заряда, а электроны “скатываются” в объем полупроводника. В результате происходит уменьшение высоты барьера и в соответствии с (2) ширины слоя обеднения (это явление обычно называют поверхностной фото-ЭДС). Проводящий канал ($d-w$), расположенный за пределами приповерхностного обедненного слоя, при освещении расширяется (или образуется, если толщина пленки подобрана так, что до освещения $d = w$ и в пленке отсутствовали свободные электроны), что сопровождается увеличением электропроводности.

Рассмотренная ситуация, когда вблизи поверхности возникает обедненный слой, разумеется, не является единственно возможной. Так, если на поверхности полупроводника n -типа доминируют ловушки-доноры, то возникает положительный

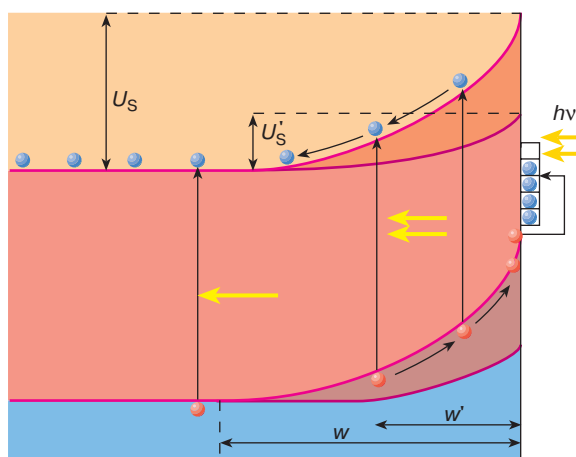


Рис. 2. Пояснение к механизму возникновения поверхностной фото-ЭДС (пунктиром показано изменение формы потенциального барьера при освещении)

поверхностный заряд, который компенсируется отрицательным зарядом свободных электронов, скапливающихся в приповерхностной потенциальной яме (рис. 1, б). Удельная электропроводность обогащенного электронами приповерхностного слоя обычно на несколько порядков превосходит объемную (в формуле (1) барьер U_s формально следует считать отрицательным), что приводит к возникновению приповерхностного проводящего канала, шунтирующего объем полупроводника. Отметим, что эффект шунтирования может оказаться крайне опасным для диодов с $p-n$ -переходами, если p - и n -области кристалла имеют общую поверхность, поскольку в этом случае значительно возрастает обратный ток диода и происходит линеаризация его вольт-амперной характеристики.

РАБОТА ВЫХОДА. КОНТАКТ МЕТАЛЛ–ПОЛУПРОВОДНИК

Наличие приповерхностного изгиба зон существенно изменяет величину работы выхода электронов с поверхности полупроводника [6]. При искривлении энергетических зон вверх в связи с возникновением дополнительного потенциального барьера U_s работа выхода возрастает. При загибе зон вниз поверхность заряжена положительно и внутреннее электрическое поле направлено от поверхности в объем, что способствует выходу электронов из кристалла (работа выхода уменьшается). Влияние состояния поверхности полупроводника на работу выхода проявляется в ряде физических явлений (например, термоэлектронная эмиссия, контактные явления, внешний фотоэффект, адсорбция и катализ). Учитывая чрезвычайно важную роль в технике и технологии полупроводников контактов металл–полупроводник (МП), рассмотрим в качестве примера роль поверхностных ловушек в формировании потенциального рельефа вблизи границы раздела полупроводника с металлом.

Прежде всего отметим, что при изготовлении полупроводниковых приборов и электронных схем используются МП-контакты двух различных типов: антизапорные (омические) и выпрямляющие (диодные). Омические контакты предназначены для пассивного подключения полупроводника ко внешней цепи, поэтому они должны обладать постоянным и предельно низким сопротивлением. Выпрямляющие МП-контакты, которые обычно называют диодами Шоттки, являются активными элементами электронных схем. Они обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой и во многих отношениях аналогичны диодам на основе $p-n$ -переходов.

Согласно модели, предложенной Шоттки (см., например, [1]), образование МП-контакта сопровождается переносом заряда через границу раздела вследствие разности работ выхода металла ϕ_m и по-

полупроводника ϕ_s . Соответствующая контактная разность потенциалов

$$V_k = \frac{\phi_s - \phi_m}{q}, \quad (3)$$

где q – заряд электрона, вызывает падение напряжения в приграничной области со стороны полупроводника. Так, для контакта на основе полупроводника n -типа следует ожидать, что при $\phi_m < \phi_s$ электроны будут переходить из металла в полупроводник, формируя обогащенный слой с малым сопротивлением (омический контакт). В этом случае со стороны полупроводника должна возникать потенциальная яма, аналогичная той, что показана на рис. 1, б. При $\phi_m > \phi_s$ направление переноса заряда изменяется: теперь электроны инжектируются из полупроводника в металл, что должно приводить к образованию обедненного слоя и соответствующего ему потенциального барьера $U_s = -qV_k$. Ясно, что для металлов с большой работой выхода энергетическая зонная диаграмма приграничной области полупроводника принципиально не должна отличаться от той, что показана на рис. 1, а. Эта ситуация соответствует формированию выпрямляющего МП-контакта (диод Шоттки). Таким образом, из рассмотренной модели вытекает простой и удоб-

ный способ управления свойствами границы металл–полупроводник, основанный на надлежащем выборе материала контакта с нужной работой выхода (например, по справочным данным о значениях ϕ_m у разных металлов). Однако, как показывают многочисленные экспериментальные исследования [1, 4], в большинстве случаев высота потенциального барьера на МП-границе зависит от работы выхода металла намного слабее, чем это следует из соотношения (3), либо не зависит вовсе (см. 1 на рис. 3). С этим связаны существенные технологические проблемы, возникающие при изготовлении омических контактов и диодов Шоттки с требуемой высотой барьера.

Выяснению причин столь слабой чувствительности контактного барьера к работе выхода металла и разработке технологических приемов, пригодных для очувствления практически важных контактных систем, посвящено большое число работ, выполненных в последние годы. В результате проведенных исследований установлено, что основную роль в закреплении высоты барьера играет аномально высокая ($>10^{13} \text{ см}^{-2}$) плотность электронных ловушек, локализованных вблизи границы полупроводник–металл. Возникновение столь высокой концентрации ловушек связано с диффузионными процессами и химическими реакциями на границе раздела фаз, в результате которых между металлом и полупроводником формируется тонкий разупорядоченный изолирующий зазор, представляющий собой обычно смесь атомов металла, полупроводника и их окисных соединений и насыщенный различного рода структурными дефектами (рис. 4).

Каким же образом пограничные ловушки препятствуют изменению высоты барьера в МП-контакте? Для того чтобы понять механизм этого эффекта, следует иметь в виду, что вероятность заполнения электронами любых энергетических уровней в полупроводнике (в том числе и поверхностных состояний) определяется положением уровня Ферми (рис. 4). При не слишком высоких температурах с хорошей степенью точности можно считать, что все уровни, расположенные по энергии ниже уровня Ферми, заполнены электронами, а выше него пустые. Если плотность энергетических уровней ловушек вблизи уровня Ферми достаточно велика, то они будут полностью экранировать объем полупроводника от электрического поля контактной разности потенциалов. При этом рассчитанное по формуле (3) напряжение будет падать не в полупроводнике, а в зазоре между металлом и полупроводником. Действительно, допустим, что для уменьшения барьера Шоттки или создания омического контакта на поверхность полупроводника напыляется металлическая пленка с меньшей, чем у полупроводника, работой выхода. Предполагается, что инжектированные из металла электроны пересекут пограничную область и пространственно рас-

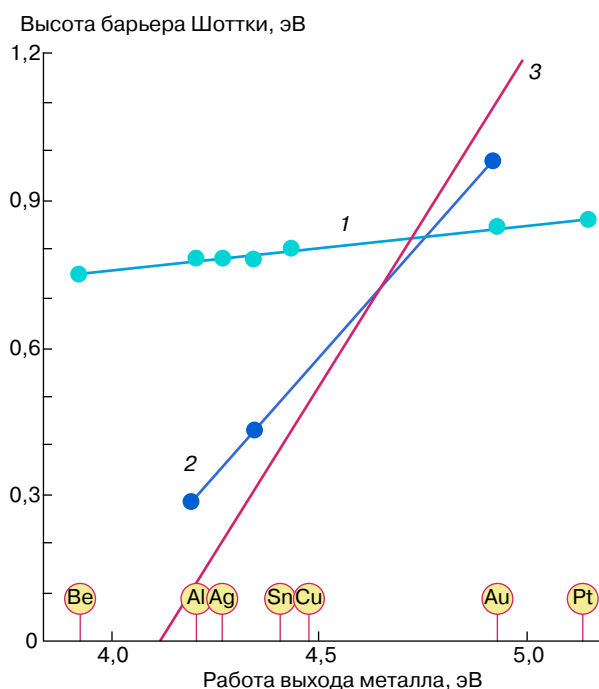


Рис. 3. Зависимости высоты барьера Шоттки в системе металл – GaAs от работы выхода металла: 1, 2 – экспериментальные значения, полученные при нанесении металлов на непассивированную (1) и пассивированную серой (2) поверхность GaAs, 3 – расчет (модель Шоттки)

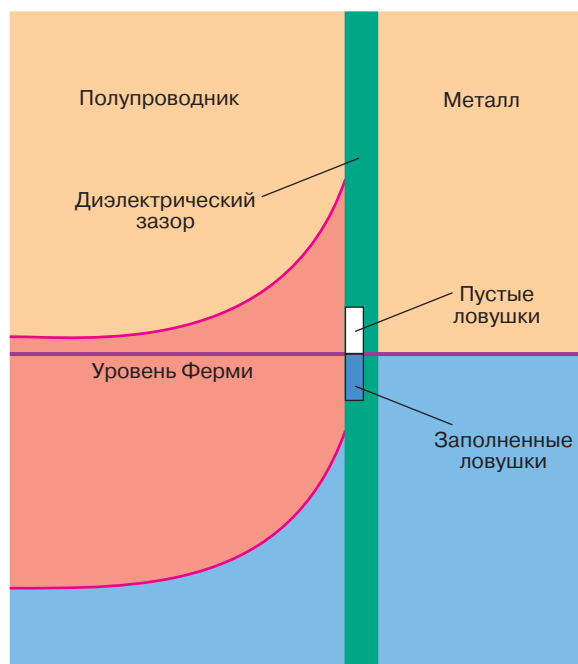


Рис. 4. Зонная диаграмма контакта металл–полупроводник с диэлектрическим зазором и поверхностными ловушками

пределятся вблизи поверхности полупроводника, уменьшая степень обеднения поверхности основными носителями заряда и приповерхностный изгиб зон. Однако при уменьшении изгиба зон все энергетические уровни на поверхности кристалла опускаются вниз. При этом незаполненные ранее поверхностные ловушки, расположенные по энергии несколько выше уровня Ферми, будут погружаться вниз и захватывать электроны, что приведет к увеличению отрицательного поверхностного заряда и изгиба зон. Если плотность ловушек вблизи уровня Ферми достаточно велика, рассмотренный механизм отрицательной обратной связи приводит к практически полному восстановлению начального изгиба зон и высота барьера Шоттки остается неизменной. Такая ситуация характерна для многих поверхностей и границ раздела и обычно обозначается термином “пиннинг” (закрепление) уровня Ферми.

ЭФФЕКТ ПОЛЯ

Эффектом поля называют явление изменения продольной проводимости полупроводника под действием поперечного электрического поля. Суть этого эффекта заключается в воздействии на поверхность полупроводника внешним полем и управлении величиной приповерхностного изгиба зон. Принцип эффекта поля лежит в основе работы полевого транзистора со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (МДП-транзистор), а также

используется в некоторых методах диагностики поверхностных состояний в полупроводниках.

Схематическое изображение МДП-структуры и электрическая схема измерения эффекта поля приведены на рис. 5. Предположим для определенности, что на управляющий электрод (затвор) подается положительное напряжение. Для экранировки заряда затвора из внешней цепи через омические контакты в приповерхностную область полупроводника входят дополнительные носители заряда (в полупроводнике *n*-типа это электроны) в количестве

$$\Delta N = \frac{C V_g}{q}, \quad (4)$$

где *C* — емкость МДП-конденсатора, *V_g* — напряжение на затворе.

Часть индуцированных полем электронов ΔN_{SC} остается в свободном состоянии. Эти электроны занимают пустые энергетические уровни в зоне проводимости, что приводит к увеличению проводимости полупроводникового слоя

$$\Delta \Sigma = q \mu_n \Delta N_{SC} \quad (5)$$

и росту тока во внешней цепи

$$\Delta I = \Delta \Sigma \cdot V_c, \quad (6)$$

где μ_n — дрейфовая подвижность электронов, *V_c* — напряжение между стоком и истоком. Другая часть индуцированных полем электронов $\Delta N_{SS} = \Delta N - \Delta N_{SC}$ будет захвачена на поверхностные ловушки и, таким образом, выйдет из игры. Ясно, что эффективность управления продольным током и коэффициент усиления транзистора зависят от того, какой механизм экранирования преобладает. Если концентрация ловушек вблизи уровня Ферми достаточно велика, а время захвата носителей на ловушки соизмеримо с длительностью входного сигнала (напряжения на

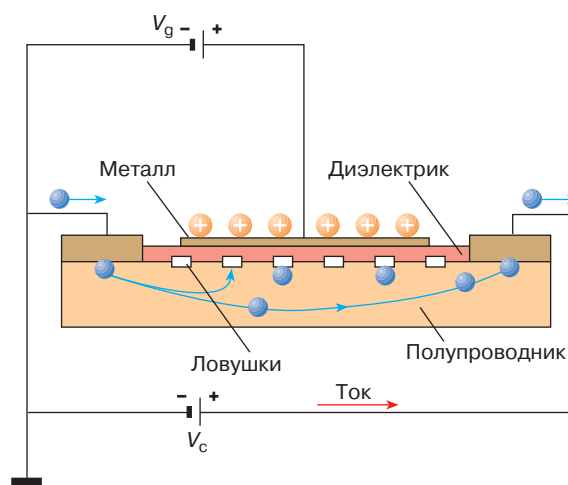


Рис. 5. МДП-структура в эффекте поля

затворе), то большая часть введенных полевых носителей успеет прилипнуть к поверхности и ток во внешней цепи изменится мало.

Таким образом, становится ясно, что для изготовления высокоэффективного МДП-транзистора требуется разработать специальные методы контроля и управления электронными свойствами поверхности полупроводника и технологию нанесения диэлектрика, которые бы обеспечили минимальное число примесей и дефектов вблизи границы раздела. В настоящее время эта задача для большинства полупроводниковых материалов остается до конца нерешенной. Вместе с тем общепризнанно, что успех в этом направлении обеспечит значительный прогресс в технологии сверхскоростных МДП-приборов на основе арсенида галлия (GaAs) и других перспективных материалов СВЧ-техники.

ПОВЕРХНОСТНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ

При разработке светоизлучающих приборов для оптоэлектроники (полупроводниковые лазеры, светодиоды) было замечено, что интенсивность электромагнитного излучения в этих приборах при прочих равных условиях тем выше, чем ниже плотность поверхностных ловушек. Исследования показали, что в предельно чистых кристаллах и пленках полупроводников основной причиной гашения люминесценции является безызлучательная рекомбинация электронов и дырок, спровоцированная поверхностными ловушками, энергетическое положение которых близко к середине запрещенной зоны. Даже при относительно низкой концентрации таких ловушек время жизни электронов и дырок резко падает за счет увеличения вероятности безызлучательных электронных переходов (ловушки, выступающие в роли центров рекомбинации, часто называют убийцами времени жизни).

Процесс поверхностной рекомбинации с участием глубоких ловушек в отличие от излучательной межзонной рекомбинации является двухступенчатым. Он состоит из захвата электронов из зоны проводимости на пустой центр рекомбинации и захвата дырки из валентной зоны на заполненный центр рекомбинации. Энергия, высвобождающаяся в каждом элементарном акте этого процесса при переходе электрона в соответствующее низкоэнергетическое состояние, не излучается в виде световых квантов, а расходуется на раскачку тепловых колебаний кристаллической решетки вблизи дефекта — центра рекомбинации, то есть фактически безвозвратно теряется. Ясно, что для улучшения качества фотоэлектрических и светоизлучательных приборов необходимо добиться предельно возможного снижения паразитной безызлучательной рекомбинации через поверхностные ловушки. Таким образом, и в этом случае мы сталкиваемся с необходимостью уменьшения их концентрации.

ПАССИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ

За последние годы в физике и технологии полупроводников сформировалось новое научное направление — пассивация поверхности, — нацеленное на разработку методов контроля и управления состоянием поверхности, снижение ее химической активности (в частности, темпа окисления на воздухе), уменьшение скорости поверхностной рекомбинации, открепление уровня Ферми на МП- и ДП-границах.

Основная сложность в решении проблемы пассивации заключается в том, что для каждого полупроводникового материала и каждой границы раздела необходимо детально (на атомном уровне) разобраться в физико-химической природе поверхностных состояний. В настоящее время благодаря совместным усилиям исследователей многих физических лабораторий достигнуты обнадеживающие результаты по пассивации поверхности полупроводниковых соединений группы A^3B^5 , которые считаются наиболее перспективными материалами для применения в оптоэлектронике и нанотехнологии. Достаточно подробно в этом отношении изучен арсенид галлия — полупроводник № 2 в современной электронной технике.

При исследовании GaAs надежно установлено, что основным фактором, вызывающим структурные нарушения и высокую плотность ловушек вблизи поверхности и границ GaAs, является элементный мышьяк, который выделяется в виде небольших скоплений (кластеров) при химическом взаимодействии полупроводника с покровной пленкой собственного оксида и при межфазных реакциях на МП- и ДП-границах. Исходя из этого при разработке методов пассивации исследователи пытались найти такой способ модификации поверхности, который бы предотвратил ее окисление и сопутствующее окислению дефектообразование. Оказалось, что одним из наиболее эффективных приемов химической модификации поверхности GaAs является сульфидная обработка полупроводника. Для сульфидирования можно использовать химическую обработку GaAs в сульфидсодержащих растворах (например, в водном растворе $Na_2S \cdot 9H_2O$) или термообработку в парах серы. В результате таких воздействий на очищенной от оксида поверхности GaAs формируется сверхтонкая (один или несколько атомных слоев) пленка Ga_2S_3 , подавляющая окисление и обеспечивающая необходимое структурно-химическое сопряжение полупроводника с внешним диэлектриком или металлом в приборных структурах.

Применение метода сульфидной пассивации позволило на несколько порядков снизить скорость поверхностной рекомбинации, в значительной степени открепить уровень Ферми на границе GaAs с металлами (график 2 на рис. 3) и создать транзисторные МДП-структуры с приемлемыми характе-

ристиками. Несомненный интерес представляют также удачные попытки пассивации путем реконструкции поверхности GaAs, когда поверхностные атомы мышьяка заменены атомами фосфора [7], а также опыты по встраиванию между GaAs и внешним диэлектриком управляющих пограничных гетерослоев (Si, InGaP и др.).

В заключение отметим, что сегодня активно развиваются исследования в области пассивации поверхности таких важных в прикладном отношении полупроводников, как InP, InAs, AlGaAs (СВЧ-диоды и транзисторы, фотоэлектронные приборы, наноэлектроника), GaP (светоизлучающие приборы), CdHgTe (ИК-техника, приборы ночного видения), что позволяет с уверенностью прогнозировать значительное расширение их практического применения и связанный с этим прогресс в технологии полупроводникового приборостроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Ч. 1. 455 с.
2. Демиховский В.Я. Квантовые ямы, нити, точки: Что это такое? // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 80–86.

3. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана. М.: Мир, 1988. 556 с.

4. Бехштейн Ф., Эндерлайн Р. Поверхности и границы раздела полупроводников. М.: Мир, 1990. 484 с.

5. Лифшиц В.Г. Поверхность твердого тела и поверхностные фазы // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 99–107.

6. Левинштейн М.Е., Симин Г.С. Барьеры. М.: Наука, 1987. 319 с. (Б-чка “Квант”; Вып. 65).

7. Бедный Б.И., Байдусь Н.В. Пассивация поверхности GaAs при обработке в парах фосфина // Физика и техника полупроводников. 1996. Т. 30, № 2. С. 236–243.

* * *

Борис Ильич Бедный, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов Нижегородского государственного университета, зам. директора Нижегородского центра инкубации наукоемких технологий. Область научных интересов – физика поверхностных и контактных явлений в полупроводниках. Автор более 90 научных работ.