

УДК 621.315.592

**Е. С. Артеменко*, Н. В. Маслеева*, А. А. Птащенко*,
Ф. А. Птащенко****

*Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

**Одесская государственная морская академия

ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ ТОК В *P-N* ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GaAs-AlGaAs

Рекомендовано до друку науковим семінаром
кафедри фізики твердого тіла і твердотільної електроніки ОНУ 31.08.2000

Проведено вимірювання вольт-амперних характеристик подвійних гетероструктур (ПГС) на основі AlGaAs-GaAs при температурах 80 – 300 К. Досліджено вплив парів води, етилену, ацетону та аміаку на поверхневий струм ПГС. Показано, що поверхневий струм в ПГС обумовлений тунельним захопленням носіїв заряду. Пари води, етилену і ацетону не змінюють поверхневий струм ПГС, в той час як аміак значно збільшує його. Час спрацьовування ПГС як сенсорів аміаку $\tau < 100$ с при кімнатній температурі.

Проведены измерения вольт-амперных характеристик двойных гетероструктур (ДГС) на основе AlGaAs-GaAs при температурах 80 – 300К. Исследовано влияние паров воды, этилена, ацетона и аммиака на поверхностный ток ДГС. Показано, что поверхностный ток в ДГС обусловлен туннельным захватом носителей заряда. Пары воды, этилена и ацетона не изменяют поверхностный ток ДГС, в то время как аммиак сильно его увеличивает. Время срабатывания ДГС как сенсоров аммиака $\tau < 100$ с при комнатной температуре.

Current - voltage curves of AlGaAs-GaAs double heterostructures (DHS) were measured at temperatures of 80 – 300K. The influence of vapors of water, ethylene, acetone, and ammonia on the surface current of DHS was investigated. It is shown that the surface current in DHS is due to the tunnel capture of charge carriers. The vapors of water, ethylene, and acetone do not change the surface current of DHS, while ammonia drastically enhances it. The response time of DHS as a sensor of ammonia is $\tau < 100$ s at room temperature.

Введение. Поверхностная рекомбинация снижает рабочие параметры полупроводниковых лазеров [1 – 3], высокочастотных биполярных транзисторов [4], фотодиодов, солнечных элементов и других приборов на основе полупроводников $A^{III}B^V$ [5 – 6]. Поверхностная рекомбинация в *p-n* переходе создает компоненту прямого тока, соответствующую выражению [6]

$$I_S(V) = I_0 \exp(qV / n_i kT), \quad (1)$$

где I_0 – постоянная; q – заряд электрона; V – приложенное напряжение; k – постоянная Больцмана; T – температура; n_i – коэффициент неидеальности ВАХ. При определенных условиях $n_i \approx 2$ [6]. Наиболее важные из этих условий: а) поверхностные состояния образуют глубокие уровни в запрещенной зоне вблизи её середины; б) данные уровни играют роль доноров в *p*-области и акцепторов в *n*-области; в) частичное заполнение поверхностных уровней электронами в *n*-области и дырками в *p*-области приводит к образованию поверхностного обедненного канала; г) плотность поверхностных уровней достаточно большая, так что при изменении высоты поверхностного барьера для основных носителей заряда заполнение электронами указанных уровней изменяется незначительно; д) изменениями положения квазиуровней Ферми для электронов и дырок внутри поверхностного обеднённого канала можно пренебречь.

Целью данной работы явилось исследование поведения поверхностных токов в p - n -переходах в интервале температур 80-300К, а также изучение влияния состава окружающей атмосферы на указанные токи.

1. Образцы и методика эксперимента. Измерения проводились на лазерных двойных гетероструктурах (ДГС) на основе AlGaAs-GaAs, описанных в предыдущих работах [7-9]. P - n -переход находился между активной областью p -GaAs(Si) и эмиттером электронов n -GaAlAs(Te) с молярной долей алюминия $x=0,1$. Толщина активного слоя составляла 0,3 мкм.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов измерялись при температурах 80-300К в криостате, наполненном гелием. Для измерения влияния паров различных веществ на ВАХ держатель с образцом помещался в стеклянный сосуд, частично заполненный соответствующей жидкостью: дистиллированной водой; этиловым спиртом; ацетоном; 10% водным раствором аммиака.

2. Влияние температуры на ВАХ гетероструктур. На рис. 1 представлены

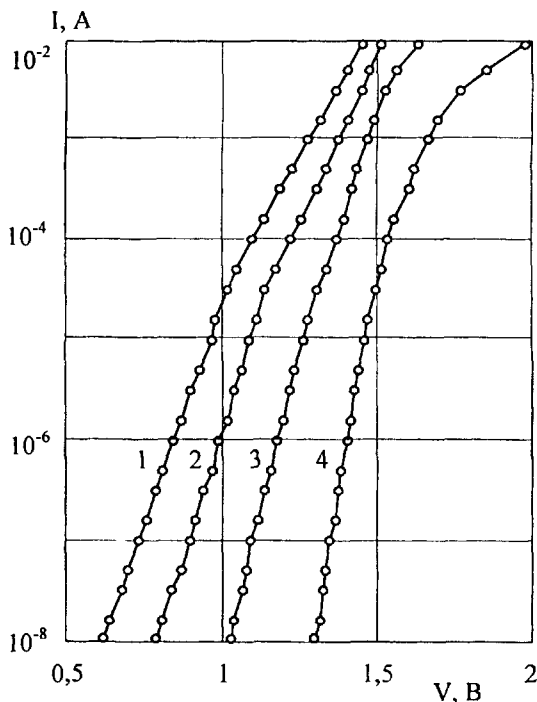


Рис.1. ВАХ гетероструктуры на основе AlGaAs-GaAs, измеренные при различных температурах, К: 1 — 293; 2 — 247; 3 — 183; 4 — 97

ВАХ одной из исследованных ДГС, измеренные при различных температурах. В областях токов $I < 10^{-4}$ А ВАХ имели экспоненциальный участок, описываемый выражением (1). При комнатной температуре коэффициент неидеальности ВАХ для различных образцов составлял $n_i = 1,75-2$ и рос при понижении температуры.

Модель поверхностных токов Генри и соавторов, уточнённая в [6], не может описать ВАХ поверхностных токов с коэффициентом неидеальности $n_i < 2$. Для объяснения экспериментальных данных нами рассчитана интенсивность поверхностной рекомбинации в предположении, что квазиуровни Ферми F_n и F_p для электронов и дырок не постоянны внутри поверхностного обеднённого канала. Для расчетов изменения величины F_n вблизи поверхности в p -области использовалось выражение [6]

$$\frac{dF_n}{dx} = \frac{j_{nx}}{\mu_n n},$$

где ось x направлена перпендикулярно к поверхности; j_{nx} — x -составляющая электронной компоненты тока; μ_n — подвижность электронов; n — концентрация электронов в данной точке. Учитывалось, что для не основных носителей заряда (электронов в p - области) имеется потенциальная яма вблизи поверхности. Поэтому максимальное изменение F_n происходит вблизи границы поверхностного канала, где концентрация электронов n минимальна. Проведенные приближённые аналитические расчёты и

численные расчёты на ЭВМ показали, что при большом поверхностном изгибе зон ($\Delta E > 0,1 \text{ эВ}$) поведение величины F_n в поверхностном обеднённом канале соответствует выражению

$$\frac{\Delta F_n}{kT} = a \frac{\Delta E}{kT} - b, \quad (3)$$

где a , b - коэффициенты, зависящие от концентрации дырок и их подвижности в p -области. При этом a , $b > 0$.

Аналогичные вычисления были проведены для дырочного квазиуровня Ферми F_p в p -области с учетом выражения, аналогичного формуле (2). В приповерхностном обедненном канале для дырок (основных носителей) имеется потенциальный барьер высотой ΔE , так что максимальный вклад в изменение величины F_p даёт часть обеднённого канала, непосредственно примыкающая к поверхности. Расчёты показали, что для дырок в p -области изменение квазиуровня Ферми в поверхностном обеднённом канале незначительно, т.е. $\Delta F_p \ll \Delta E$, что соответствует результатам предыдущих оценок [6].

Сопоставление результатов расчётов ΔF_n и ΔF_p показало, что смещение квазиуровня Ферми в поверхностном канале с ростом уровня инжекции уменьшается для неосновных носителей заряда и растёт для основных носителей заряда.

Учёт величины ΔF_n , даваемой формулой (3), приводит к выражению для ВАХ поверхностного тока вида (1), где

$$n_i = 1 + (1 - a)n_{i0}, \quad (4)$$

причём, в соответствии с расчётами [2],

$$n_{i0} = 1 / \{1 - \hbar^2 / [6m_i W_1^2 (kT)^2]\}, \quad (5)$$

где m_i - «туннельная» эффективная масса носителей заряда; W_1 - коэффициент в формуле для толщины поверхностного обеднённого канала

$$W = W_1 (\Delta E)^{1/2}. \quad (6)$$

Полученные из анализа экспериментальных данных температурные зависимости коэффициента неидеальности ВАХ хорошо соответствуют выражению (5) при $W_1 = 60 - 220 \text{ нм эВ}^{-1/2}$.

3. Влияние состава окружающей атмосферы на ВАХ гетероструктур. На рис. 2 представлены ВАХ прямого тока одной из исследованных гетероструктур, находившейся в воздухе (кривая 1) и помещённой в сосуд с насыщенными парами ацетона (2) и аммиака (3) при комнатной температуре.

Кривые 1 и 2 в области токов $I = 10^{-8} - 10^{-6} \text{ А}$ имеют экспоненциальные участки, соответствующие формуле (1) с коэффициентом неидеальности $n_i \approx 2$. С учетом результатов работы [2] это значит, что ток в данной области ВАХ обусловлен поверхностной рекомбинацией носителей заряда. Используя выражение (3) для ΔF_n , в результате расчетов, аналогичных выполненным в работе [2], получим для интенсивности поверхностной рекомбинации

$$R_S = \left[(C_p N_s)^{(1-a)n_{i0}} C_n P_s \exp b \right]^{1/n_i} \frac{n_i^{2/n_i}}{P_h^{(2-n_i)/n_i}} \exp \frac{F_{nb} - F_{ph}}{n_i}, \quad (7)$$

где C_n , C_p - коэффициенты захвата электронов и дырок поверхностными состояниями; N_s , N_p - плотности занятых электронами и пустых поверхностных состояний, соответственно; a , b - коэффициенты в формуле (7); P_h - объемная концентрация дырок на границе поверхностного обедненного канала в p -области; n_i - собственная

концентрация носителей заряда в GaAs; F_{nb}, F_{pb} – положение квазиуровней Ферми для электронов и дырок в объеме, на границе поверхностного канала.

Из формулы (7) следует, что интенсивность поверхностной рекомбинации существенно зависит от величин C_n, C_p и N_s, N_p . Коэффициент захвата электрона определяется выражением

$$C_n = \sigma_n V_n, \quad (8)$$

где σ_n – сечение захвата электрона “пустым” поверхностным состоянием; V_n – тепловая скорость электрона. Аналогично определяется коэффициент захвата дырки.

Кривые 1 и 2 на рис.2 в области токов $I < 10^{-4}$ А практически совпадают. Это значит, что пары ацетона не изменяют плотность поверхностных состояний в исследованных ДГС, а также не влияют на заполнение данных состояний электронами. При этом остаются неизменными и сечения захвата электрона и дырки. Аналогичные результаты получены и для данных ДГС, находящихся в насыщенных парах воды и в парах этилена.

Причиной неизменности параметров поверхностных состояний в парах указанных веществ может быть высокая плотность поверхностных состояний на границе GaAs – собственный оксид, а также защищенность поверхности GaAs слоем собственного оксида. Это соответствует оценке [2,6]: $N_s > 10^{12} \text{см}^{-2}$. При этом, если и образуются новые поверхностные состояния при взаимодействии GaAs с адсорбированными молекулами (ионами), то плотность этих дополнительных состояний меньше 10^{12}см^{-2} . Кроме того, данные состояния образуются на внешней поверхности

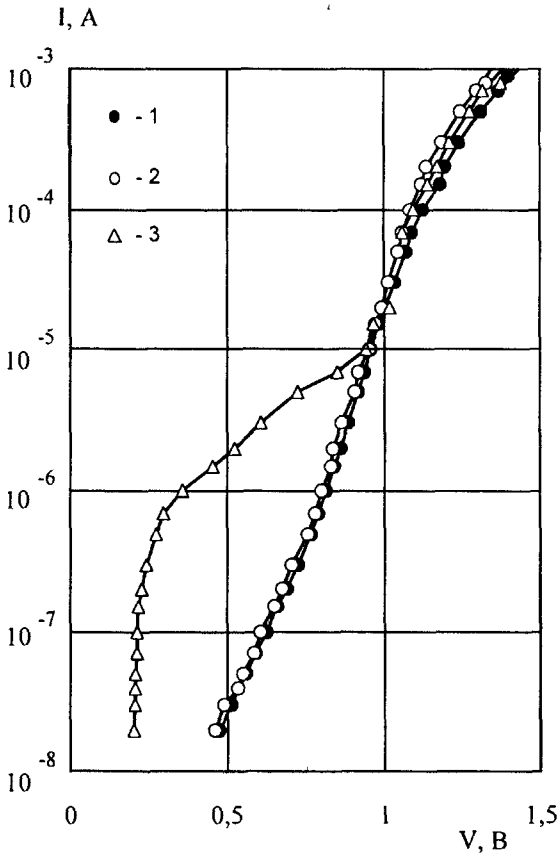


Рис. 2. ВАХ гетероструктуры, измеренные в различных атмосферах: 1 – в воздухе; 2 – в парах ацетона; 3 – в парах аммиака

оксида. Поэтому для рекомбинации через эти дополнительные состояния электроны и дырки должны туннелировать через слой оксида. Это приводит к малым сечениям захвата электронов и дырок данными поверхностными состояниями.

Сопоставление кривых 3 и 1 на рис. 2 показывает, что пары аммиака резко увеличивают прямой ток гетероструктуры при напряжениях $V < 1$ В. Участок кривой 3, соответствующий напряжениям $V < 1$ В, построенный в линейном масштабе, представляет прямую линию. Это значит, что на поверхности гетероструктуры образуется проводящий слой. Молекулы аммиака являются донорами для GaAs. Поэтому можно предположить, что под действием электрического поля захваченных положительных ионов аммиака в приповерхностном слое p - n -гетероструктур образуется проводящий

канал с электронной проводимостью. Если принять, что подвижность электронов в проводящем канале такая же, как в объеме, то, исходя из величины тока в данном канале, для поверхностной плотности электронов в канале получим $n_s \sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

На рис.3 кривая 1 представляет нарастание тока (при напряжении $V=1\text{В}$) ДГС после помещения образца в сосуд с насыщенными парами аммиака над его 10% водным раствором. Нарастание тока было экспоненциальным и соответствовало характеристическому времени $\tau_1=50 - 75\text{с}$. Кривая 2 на рис. 3 отражает спад тока ДГС после её переноса из сосуда с парами аммиака в сухой воздух. Данная кривая – также экспонента. Время спада тока для разных образцов составляло $\tau_2=7 - 9\text{с}$.

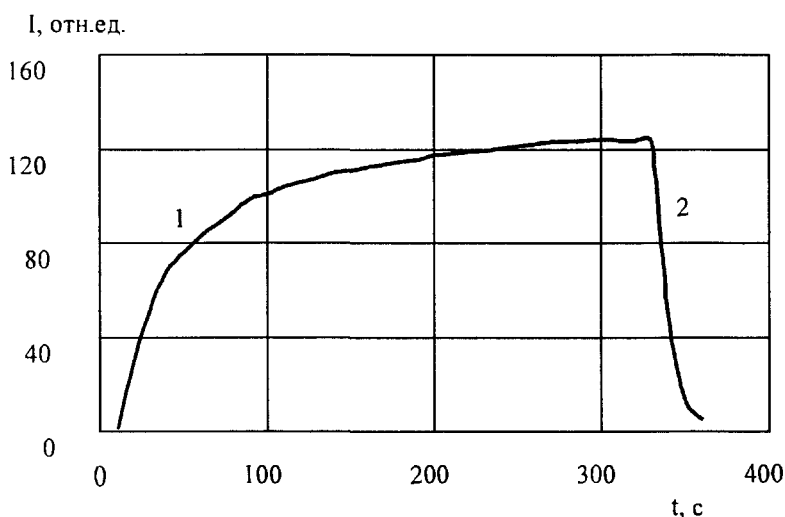


Рис. 3. Кинетика изменения тока гетероструктуры: 1 – после помещения ДГС в пары аммиака; 2 – после переноса образца в сухой воздух

Следует отметить, что кривые нарастания и спада тока в исследованных гетероструктурах, измеренные при помещении образцов в сосуд с парами аммиака и при их переносе в сухой воздух, были воспроизводимы.

Различие характеристических времен нарастания и спада тока в ДГС τ_1 и τ_2 можно объяснить сложностью процесса образования проводящего канала: а) сначала происходит адсорбция молекулы NH_3 на поверхность собственного оксида; б) электрон туннелирует с адсорбированной молекулы в кристалл через слой оксида. При этом образуется положительный ион NH_3^+ ; в) происходит накопление ионов NH_3^+ , которое сопровождается образованием поверхностного проводящего канала в гетероструктуре.

Заключение. Проведенные исследования вольт-амперных характеристик поверхностных токов в двойных гетероструктурах на основе GaAs- GaAlAs позволяет сделать следующие выводы:

1. Температурные зависимости поверхностных токов свидетельствуют о туннельном механизме захвата носителей заряда поверхностными состояниями.

2. Учет изменения положения квази-уровня Ферми для электронов в приповерхностном канале позволяет объяснить величину коэффициента неидеальности ВАХ.

3. Насыщенные пары воды, этилового спирта и ацетона практически не влияют на поверхностные токи исследованных гетероструктур.

4. Пары аммиака существенно увеличивают поверхностный ток гетероструктур. Данный эффект можно объяснить образованием проводящего канала под действием электрического поля, создаваемого ионами NH_3^+ .

5. Изменения ВАХ гетероструктур при помещении образцов в атмосферу аммиака может быть использовано для создания селективных газовых сенсоров. Время отклика р-п-гетероструктуры на основе GaAs- GaAlAs в качестве сенсора паров аммиака при комнатной температуре не превышает 100с.

1. Gribkovskii V. P. Injection Lasers// Progr. Quant. Electr. – 1994. – V. 19, № 1. – P. 41 – 88.
2. Ptashchenko A. A., Ptashchenko F. A. Tunnel surface recombination in optoelectronic device modelling // Proc. SPIE. -1997. -V. 3182. – P. 145 – 149.
3. Ptashchenko A. A., Ptashchenko F. A. Polarization effects in stressed AlGaAs laser heterostructures // Abstracts of the First International School and Conference on Polarization Effects in Lasers and Spectroscopy. – Toronto (Canada). – 1997. – P. TU. 2:45.
4. Borgarino M., Plana R., Delage S.L., Fantini F., Graffenil J. Influence of surface recombination on the burn – in effect in microwave GaInP/GaAs HBT's // IEEE Transact. on Electron Devices.– 1999. – V. 46, №1. – P. 10 – 15.
5. Dodd P. E., Stellwag T.B., Melloch M. R., Lundstrom M. S. Surface and perimeter recombination in GaAs diodes: an experimental and theoretical investigation // IEEE Transact. on Electron Devices.– 1991. – V. 38, №6. – P. 1253 – 1260.
6. Mazhari B., Morkoc H. Surface recombination in GaAs PN junction diode// Journ. of Appl. Phys. – 1993. – V. 73, № 11. – P. 7509 – 7514.
7. Ptashchenko A. A., Deych M. V., Mironchenko N. V., Ptashchenko F. A. Polarization of the spontaneous radiation of stressed laser heterostructures// Solid-State Electronics.– 1994. – V. 37, № 4 – 6. – P. 1255 – 1258.
8. Ptashchenko A. A., Ptashchenko F. A. “Excess” polarization of the spontaneous emission in laser heterostructures// Solid-State Electron. – 1996. – V.39, № 10. – P. 1495 – 1500.
9. Птащенко А. А., Птащенко Ф. А. Тонкая структура углового распределения излучения полупроводниковых лазеров // Фотозлектроника. – 1999. – №8. – С. 6 – 12.