

©1995 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ДОНОРНЫХ ЦЕНТРОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НА ГРАНИЦАХ КВАНТОВОЙ ЯМЫ GaSb/InAs/GaSb

*А.П.Дмитриев, С.А.Емельянов, С.В.Иванов, Б.Я.Мельцер,
Я.В.Терентьев, И.Д.Ярошецкий*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 10 октября 1994 г. Принята к печати 12 октября 1994 г.)

Из анализа температурной зависимости фототока, индуцируемого дальним инфракрасным излучением в асимметричной квантовой яме GaSb/InAs/GaSb, помещенной в параллельное магнитное поле, впервые определена энергия локализованных на границах ямы донорных центров, которые при низких температурах определяют концентрацию и подвижность электронов в квантовых ямах такого типа. Энергия составляет приблизительно 35 мэВ относительно края валентной зоны GaSb.

Экспериментально установлено, что при достаточно низких температурах количество электронов в квантовой яме GaSb/InAs/GaSb значительно превосходит количество дырок в приграничных областях [1-4]. Вместе с тем, согласно теоретическим представлениям, в структурах такого типа потолок валентной зоны GaSb лежит приблизительно на 150 мэВ выше дна зоны проводимости InAs и количество электронов в яме должно быть равно количеству дырок в барьерах. Это противоречие принято объяснять существованием в реальных структурах локализованных вблизи границ ямы некоторых донорных центров, которые ионизованы уже при нулевой температуре, поскольку соответствующие им энергетические уровни лежат выше потолка валентной зоны GaSb. Поверхностная концентрация этих уровней весьма велика и приблизительно равна концентрации электронов в яме (порядка 10^{12} см^{-2}), поэтому принято считать, что эти центры определяют и подвижность электронов в яме при достаточно низких температурах. Известно также, что если не предпринять специальных технологических мер, то концентрация центров на одной из границ значительно превосходит их концентрацию на другой [5], т.е. существование этих центров приводит к тому, что реальная квантовая яма GaSb/InAs/GaSb при низких температурах резко асимметрична. Однако, несмотря на то что обсуждаемые центры определяют ключевые параметры электронного

газа в реальных ямах GaSb/InAs/GaSb, энергетическое положение соответствующих им уровней до сих пор не определено.

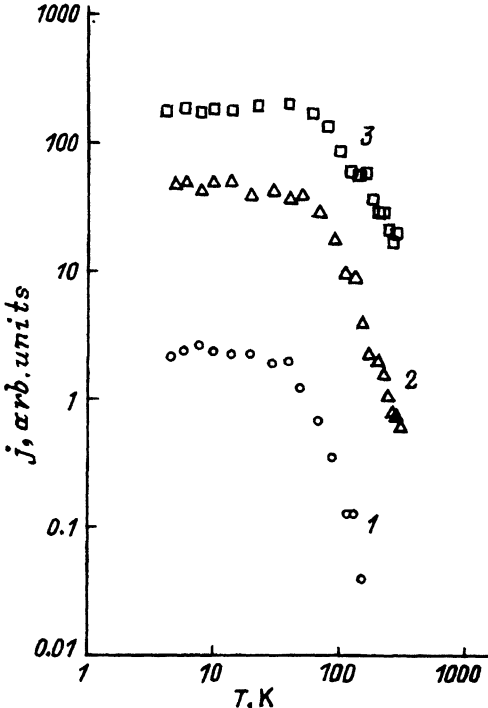
В настоящей работе сообщается о первом экспериментальном определении энергии донорных центров, локализованных на границах квантовой ямы GaSb/InAs/GaSb.

Измерялся фототок j , возникающий в плоскости одиночной квантовой ямы GaSb/InAs/GaSb без каких-либо внешних источников напряжения при приложении к ней магнитного поля и возбуждении дальним инфракрасным излучением [6]. Излучение направлялось перпендикулярно плоскости образца, а вектор магнитного поля лежал в плоскости ямы перпендикулярно направлению измеряемого фототока. Измерения проводились в режиме короткого замыкания в диапазоне температур от 4.2 до 300 К. В качестве источника излучения использовались импульсный лазер на парах тяжелой воды с оптической накачкой СО-лазером. Длина волны излучения — $\lambda = 385$ мкм, длительность импульса — 100 нс, интенсивность излучения I — до 150 Вт/см². Исследуемые образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs ориентации (001), так что встроенное пьезоэлектрическое поле в яме отсутствовало [7]. Ширина ямы составляла 200 \AA , а толщина верхнего слоя GaAs — 1200 \AA , что позволяло исключить влияние поверхностного потенциала на электроны в яме [3]. Образцы имели следующие типичные параметры: поверхностная концентрация электронов в яме $n_s = 1.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, подвижность $\mu = 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$ и $n_s = 2.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 2.2 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 300 \text{ К}$.

Импульсы тока в образце повторяли форму возбуждающих лазерных импульсов. Амплитуда импульсов тока была пропорциональна величине внешнего магнитного поля B , а направление тока изменялось на противоположное с изменением знака B . На рисунке приведена температурная зависимость фототока в диапазоне от 4.2 до 300 К при трех различных интенсивностях возбуждающего излучения. Отчетливо видно, что в интервале от 4.2 до 50 К ток почти не изменяется, тогда как при увеличении T выше 50 К его величина резко падает.

В настоящее время существует несколько моделей, способных качественно описать на микроскопическом уровне эффект возникновения фототока. Однако все они основаны по существу на наличии в вероятности возбуждения и релаксации электронов в асимметричной яме слагаемого вида: $\gamma(k[B \times n])$, где n — единичный вектор, перпендикулярный плоскости ямы, k — волновой вектор электрона в яме, γ — коэффициент, зависящий от асимметрии ямы. В условиях эксперимента, когда влияние пьезоэлектрического поля и поверхностного потенциала на квантовую яму исключено, единственная причина асимметрии состоит в том, что концентрация заряженных центров на одной из гетерограниц значительно превосходит их концентрацию на другой. Таким образом, фототок должен быть пропорционален концентрации центров.

С другой стороны, в рассматриваемом случае сильно вырожденного электронного газа ($\epsilon_F \sim 100$ мэВ) влияние температуры на параметры последнего весьма слабое и, на первый взгляд, фототок не должен существенно зависеть от T . Однако в эксперименте в интервале температур от 50 до 300 К в соответствии с рисунком фототок уменьшается почти на 2 порядка. При этом концентрация электронов и их подвижность в этом температурном интервале изменяется примерно



Зависимость фототока от температуры образца при $B = 1.6$ Т. I , Вт/см²:
 1 — 1.5, 2 — 15, 3 — 150.

двое. Наблюдаемую температурную зависимость можно объяснить следующим образом. С увеличением температуры от 4.2 до 300 К уровень Ферми в объемных слоях GaSb и, соответственно, во всей системе поднимается с 20 до 100 мэВ над потолком валентной зоны GaSb. Если теперь считать, что энергетический уровень, соответствующий центрам, находится именно в этом интервале энергий, то при повышении T с 4.2 до 300 К начиная с некоторой температуры должно наблюдаться экспоненциальное падение тока, обусловленное резким уменьшением асимметрии ямы вследствие заселения первоначально ионизированных центров электронами, поступающими из объемных слоев GaSb. Именно такое поведение температурной зависимости тока и наблюдается в эксперименте (см. рисунок). Используя экспериментальные кривые на рисунке, мы оценили энергию донорного уровня в исследуемых структурах, которая составила величину, приблизительно равную 35 мэВ относительно потолка валентной зоны GaSb.

Таким образом, измерения индуцируемого дальним инфракрасным излучением фототока в параллельном магнитном поле позволили экспериментально оценить энергию локализованных на границах квантовой ямы GaSb/InAs/GaSb донорных центров, определяющих при относительно низких температурах концентрацию и подвижность электронов в двумерном канале.

Настоящая работа стала возможной благодаря финансовой поддержке Международного научного фонда (Грант № NU5000) и Российского фонда фундаментальных исследований (Код 94-02-05044-а). Мы признательны также Международному научному фонду и Американскому физическому обществу за индивидуальные гранты авторам работы.

- [1] E.E. Mendez, L. Esaki, L.L. Chang. Phys. Rev. Lett., **55**, 2216 (1985).
- [2] H. Munekata, E.E. Mendez, Y. Iye, L. Esaki. Surf. Sci., **174**, 449 (1986).
- [3] M. Altarely, J.C. Maan, L.L. Chang, L. Esaki. Phys. Rev. B., **35**, 9867 (1987).
- [4] П.С. Копьев, С.В. Иванов, Н.Н. Леденцов, Б.Я. Мельцер, М.Ю. Надточий, В.В. Устинов. ФТП, **24**, 717 (1990).
- [5] J. Luo, H. Munekata, F.F. Fang, P.J. Stiles. Phys. Rev. B, **38**, 10142 (1988).
- [6] А.П. Дмитриев, С.А. Емельянов, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Я.В. Терентьев, И.Д. Ярошецкий. Письма ЖЭТФ, **54**, 279 (1991).
- [7] D.L. Smith. Sol. St. Commun., **57**, 919 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

Experimental measurements of the energy of interface donor centers in GaSb/InAs/GaSb quantum well

A.P. Dmitriev, S.A. Emelyanov, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, Ya.V. Terent'ev, I.D. Yaroshetsky

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

The energy of interface donor centers, which are responsible for the electron concentration and mobility at low temperatures in GaSb/InAs/GaSb quantum well, has been first found by using the temperature dependence of the far-infrared light-induced current in the presence of a parallel magnetic field. The energy proved to be approximately 35 meV above GaSb valence band edge.

