

Смещение пика ТСТ в $n^+ - p$ -переходе ΔT_M относительно температуры максимума при $\beta^* = \beta$ (1-5) и величина β/β^* (1'-5') в зависимости от $(V_2 - V_1)$ и отношения концентраций мелких и глубоких акцепторов N/N_f .

$\Delta T = T_M(\beta^* \neq \beta) - T_M(\beta^* = \beta)$, $\Delta T_M(\beta^* = \beta) = 151.5$ К; $\epsilon_0 = 7.69 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, $E = 0.42$ эВ, $\beta = 0.39$ К/с. N/N_f : 1, 1' - 5, 2, 2' - 1, 3, 3' - 0.2, 4, 4' - 0.04, 5, 5' - 0.008. $V_1 + V_C = 1.5$ В, $N_f = 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

при уменьшении V_2 при фиксированной величине V_1 может быть ошибочно приписан проявлению зависимости скорости эмиссии от электрического поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] С. Т. Sah, W. W. Chan, H. S. Fu, J. W. Walker. Appl. Phys. Lett., 20, 193 (1972).
- [2] Н. А. Урманов, М. Н. Степанова. ФТП, 27 (1993).
- [3] M. G. Buechler. Sol. St. Electron., 15, 69 (1972).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 9, 1993

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ В ОБЛАСТИ ГЕТЕРОГРАНИЦЫ $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-GaAlAsSb}$

А. Б. Богословская, Н. М. Колчанова, Ф. И. Маняхин, А. А. Попов,
Г. А. Сукач

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021,
Санкт-Петербург, Россия

(Получено 11 декабря 1992 г. Принято к печати 23 апреля 1993 г.)

В последние годы на основе гетеропереходов $\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$, изопериодных GaSb , были созданы высокоэффективные светодиоды и исследована природа излучательной рекомбинации в них [1]. Определяющее влияние на эффективность светодиодов оказывает распределение примесей в активной области (АО) и взаимное расположение $p-n$ -перехода и гетерограниц [2-4].

Настоящая работа посвящена исследованию профиля распределения примеси в области гетероперехода, образованного четырехкомпонентными растворами $\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$, изопериодными к GaSb , и определению его характеристик.

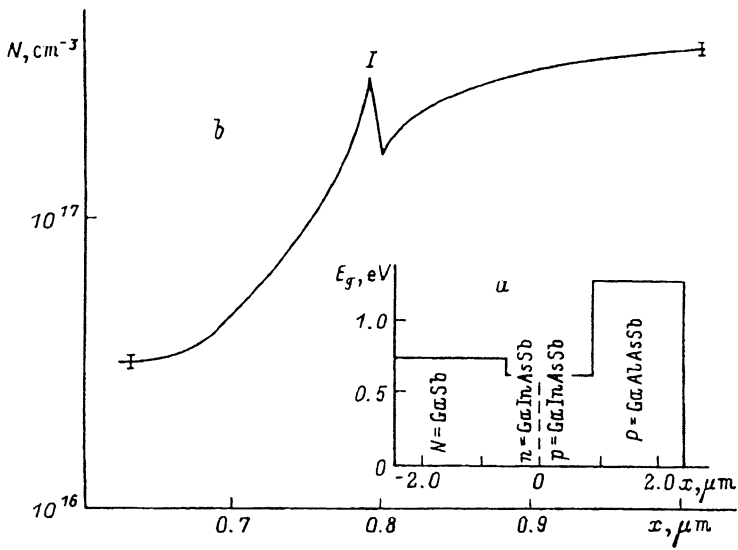


Рис. 1. *a* — структура изученных гетероструктур; *b* — экспериментальное распределение концентрации носителей тока вдоль оси x светодиодной гетероструктуры. Отсчет ведется от n — p -перехода. Величина обратного смещенно-приложенного напряжения растет в направлении оси x .

Гетеросветодиоды n -GaSb/ n -GaInAsSb/ p -GaAlAsSb были созданы методом жидкофазной эпитаксии при температуре $T = 870$ K на подложке n -GaSb:Te (100) ($n = 1 \cdot 10^{17}$ cm^{-3}). АО n -Ga_{0.90}In_{0.10}As_{0.09}Sb_{0.91}, толщиной $h = 1.5$ мкм легировалась Te из навески GaSb:Te. Слой P^+ -Ga_{0.66}Al_{0.34}As_{0.02}Sb_{0.98}, толщиной $h = 2$ мкм легировался Ge ($p = 1 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}). При формировании жидкой фазы в качестве компонент шихты были использованы нелегированные InAs, In-4N, Sb-4N, (n -GaInAsSb) и GaSb, Al-4N, GaAs (p -GaAlAsSb). Процесс эпитаксии проводился в графитовой cassette в атмосфере водорода, которая предварительно отжигалась при температуре $T = 1100$ K. После эпитаксии образец быстро охлаждался до комнатной температуры. Рассогласование постоянных решеток слоев гетероструктуры контролировалось методами рентгеновской дифрактометрии и не превышало $7 \cdot 10^{-4}$. Исследовались меза-светодиоды диаметром 300 мкм со сплошным омическим контактом к n -GaSb (Au + 5% Te) и точечным контактом (Au + 5% Ge) диаметром 40 мкм к p -GaAlAsSb, полученные на выращенной гетероструктуре методом фотолитографии.

Профиль распределения примеси, доминирующей в области объемного заряда, исследовался с помощью двухчастотного метода измерения емкости обратносмещенного p — n -перехода на разностной частоте [5].

На рис. 1 представлено распределение концентрации носителей $N(x)$ ($N(x)^{-1} = N_a^{-1} + N_d^{-1}$) для одного из образцов вблизи p — n -перехода. Особенностью кривой на рис. 1 является немонотонность в распределении примеси, характеризующейся резким максимумом на расстоянии 0.8 мкм от p — n -перехода. Слева от максимума имеет место спад концентрации носителей до постоянной величины, составляющей $3 \cdot 10^{16}$ cm^{-3} . Слева от максимума, за область с отрицательным значением наклона, идет плавное нарастание значения концентрации носителей тока. Независимые исследования положения p — n -перехода методом растровой электронной микроскопии показали, что ОПЗ полностью заключена в активной области светодиода и p — n -переход расположен на расстоянии 0.7 ± 0.1 мкм от GaInAsSb/GaAlAsSb-гетерограницы. Такое распределение характерно для большинства исследованных светодиодов с АО на основе GaInAsSb, полученных по описанной технологии.

Проанализируем экспериментальные результаты. При использовании легирующих примесей (Ge, Te) в нашей технологии получения структур возможно несовпадение p - n -перехода и гетерограницы. Вследствие того что коэффициент диффузии Ge примерно на 2 порядка больше, чем Te, и с учетом соотношения донорной и акцепторной примесей p - n -переход окажется сдвинутым в АО. Однако диффузия Ge не должна изменить плавного характера распределения примесей в области p - n -перехода и привести к немонотонности в распределении носителей. Она приводит к появлению p - n -гомоперехода в АО и p - p -GaInAsSb/GaAlAsSb-гетерограницы. Поэтому $N(x)$ в нашем случае имеет смысл распределения дырок в p -материалах структуры (рис. 1, вставка).

Рост обратного напряжения U_z способствует расширению ОПЗ, смещению ее в направлении p -GaInAsSb/ p -GaAlAsSb-гетерограницы и проявлению характерных особенностей в распределении носителей тока в области p - p -гетероперехода. Такими особенностями могут быть немонотонность валентной зоны, обусловленная разрывом на p -GaAlAsSb/ p -GaInAsSb-гетерогранице, которая может привести к экстремумам в распределении $N(x)$. По мере удаления от n - p -перехода концентрация носителей плавно нарастает, что соответствует сильно легированной эмиттерной области. Участок с отрицательным наклоном концентрации дырок следует связать с характером p - p -гетероперехода.

Размер слоя локализации дырок, определенный по полуспаду максимального значения концентрации со стороны p -GaInAsSb, порядка 200 Å. Пространственное разрешение метода определяется длиной Дебая и составляет 100—150 Å. Размер области гетероперехода в структурах не превышает этого значения. Погрешность определения $N(x)$ и x приведена на рис. 1, b .

Используя экспериментальные данные, определим значение разрывов валентной зоны ΔE_v для нашего состава. Впервые определение разрывов зон по профилю распределения примеси, полученного из вольт-емкостных измерений, было предложено Кромером [6]. Как было показано, электростатическая разность потенциалов между двумя границами интерфейса $\Delta\Phi = \Phi(\infty) - \Phi(0)$ выражается зависимостью

$$\Delta\Phi = q/\epsilon \int_0^{\infty} [N_d(x) - n(x)](x - x_i) dx, \quad (1)$$

где x — координата перпендикулярна поверхности интерфейса, q — заряд электрона, ϵ — диэлектрическая проницаемость, N_d — полная концентрация доноров, x_i — координата интерфейса. Кроме того,

$$\Delta\Phi = (kT/q) \ln \{ [n(\infty)/n(0)] [N_d(0)/N_d(\infty)] \} + \Delta E_v/q, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура.

Совместное решение уравнений (1) и (2) с использованием экспериментальных данных (рис. 1) дает значение разрыва валентной зоны $\Delta E_v = 56$ мэВ. Известно, что на значение величины ΔE_v помимо точности измерений $N(x)$ и x оказывает влияние величина поверхностного заряда на интерфейсе, которая определяется как

$$\sigma = - \int_0^{\infty} [N_d(x) - n(x)] dx. \quad (3)$$

Используя данные рис. 1, σ составляет величину $4 \cdot 10^{11}$ см⁻². Учитывая значение поверхностного заряда и точность измерений, ошибка в определении разрыва зон в нашем случае не превышает 13 мэВ. Построенная на основании рис. 1 зонная диаграмма p - p -перехода представлена на рис. 2.

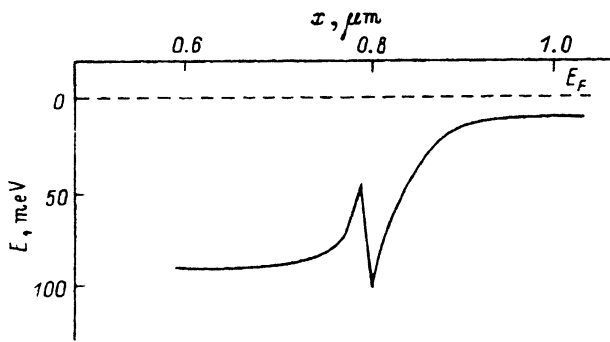


Рис. 2. Энергетическая диаграмма валентной зоны вблизи p -GaInAsSb/ p -GaAlAsSb гетероперехода, рассчитанная на основании данных рис. 1, б.

Таким образом, анализ распределения концентрации носителей тока в светодиодных гетероструктурах показал смещение n - p -перехода от n -GaInAsSb/ p -GaAlAsSb-гетерограницы в глубь АО на расстояние 0.8 мкм, связанное с диффузией Ge из сильно легированного эмиттера. Немонотонность распределения дырок, обусловленная разрывом зон, позволила экспериментально установить значение разрыва валентных зон на p -Ga_{0.9}In_{0.1}As_{0.09}Sb_{0.91}/ p -Ga_{0.66}Al_{0.34}As_{0.02}Sb_{0.98}-гетерогранице — $\Delta E_v = 56 \pm 13$ эВ.

В заключение авторы благодарят Ю. П. Яковлева за интерес к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. А. Андаспаева, А. Н. Баранов, А. А. Гусейнов и др. ФТП, 24, 1708 (1990).
- [2] У. А. Бекирев, Н. В. Кузнецов, Л. П. Сидорова и др. ФТП, 13, 13 (1979).
- [3] В. W. Hakki. J. Appl. Phys., 52, 6054 (1981).
- [4] I. B. Puzin, V. Ya. Phylipchenko, M. K. Sheinkman et al. Semiconduct. Sci. Technol., 7, 529 (1992).
- [5] Л. С. Берман. Емкостные методы исследования полупроводников, 104. Л. (1972).
- [6] H. Kroemer, Wu-Yu. Chien. J. S. Harris. Appl. Phys. Lett., 36, 295 (1980).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 27, вып. 9, 1993

О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ В АМОРФНОМ НИТРИДЕ КРЕМНИЯ

В. А. Терехов, В. Н. Селезнев, Э. П. Домашевская

Воронежский государственный университет им. Ленинского комсомола, 394093, Воронеж, Россия

(Получено 9 апреля 1993 г. Принято к печати 28 апреля 1993 г.)

Аморфный нитрид кремния благодаря ряду уникальных свойств широко применяется в современной микроэлектронике. Наиболее важным в физике этого материала является изучение спектра локализованных состояний (ЛС) в щели подвижности, определяющего его электрофизические, оптические свойства и возможности применения. Ранее было показано, что рентгеновские эмиссионные SiL_{2,3}-спектры позволяют анализировать характер энергетического распределения