

Член-корреспондент АН СССР Г. Б. АБДУЛЛАЕВ, З. А. ИСКЕНДЕР-ЗАДЕ,
Э. А. ДЖАФАРОВА, М. Р. АХУНДОВ, Ш. А. АЛИХАНОВА

ОБ ИНВЕРСИИ РЕАКТИВНОСТИ ($p-n$)-ПЕРЕХОДОВ

В основе действия приборов с ($p-n$)-переходом лежат физические явления, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами. Инерционность этих процессов, происходящих в широкозонных полупроводниках через локальные уровни в запрещенной зоне, приводит к появлению сдвига фаз между током и напряжением при приложении к ($p-n$)-переходу переменного сигнала. Инверсия реактивности ($p-n$)-структур (переход емкостной реактивности в индуктивную) наблюдается как при прямом (¹⁻³), так и обратном (^{3, 4}) смещениях. Зависимость $U_{\text{инв}}$ при прямом смещении от концентрации легирующей примеси в базовой области (³), инверсия при фотоинжекции (⁵) показывают, что последнее наблюдается при совпадении концентраций инжектированных и равновесных основных носителей. Напряжение инверсии для резких переходов, данное в (³), а для плавных при условии $\omega\tau \simeq 1$ выражается (³) как

$$U_{\text{инв}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N^2 + n_i^2}{n_i^2}, \quad (1)$$

где N — концентрация легирующей примеси в базе, или

$$U_{\text{инв}} = \frac{\Delta E_g}{q} - 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{\sqrt{N_c P_v}}{N}, \quad (1')$$

где N_c, P_v — эффективная плотность состояний в c - и v -зонах.

В данной работе поставлена цель экспериментально проверить справедливость формулы (1'), указывающей на линейную зависимость $U_{\text{инв}}$ от ΔE_g ; выяснить связь условий интенсивного свечения диодов с инверсией реактивности; изучить влияние природы глубоколежащих уровней на параметр инверсии. Нами исследованы реактивные свойства ($p-n$)-переходов, созданных на n - и p -кремнии, германии, фосфиде индия, фосфиде галлия (с зеленым и красным свечением) (рис. 1, правые ветви кривых $\lg C(U_{\text{пр}})$, соответствующая отрицательной емкости $C^- = 1/(\omega^2 L)$, также представлена в верхней полуплоскости). Напряжение инверсии определяется материалом, на котором создан ($p-n$)-переход. Для кремниевых ($p-n$)-структур с золотом ($E_c = -0,54$ эВ) и никелем ($E_c = +0,22$ эВ) величины $U_{\text{инв}}$ одинаковы. Для фосфид-галлиевых переходов различие природы рекомбинационных центров в образцах с красным (0,690 м) и зеленым (0,565 м) свечением (⁶) не отражается на величине $U_{\text{инв}}$, которая имеет порядок 1,82—1,90 в. Важно отметить, что при инверсии реактивности наблюдается интенсивное свечение фосфид-галлиевых ($p-n$)-переходов обоих типов.

Экспериментально подтверждена линейная связь $U_{\text{инв}}$ с ΔE_g (рис. 2: точки — экспериментальные данные, прямые — расчет по (1') при 300 и 77° К, $N \simeq 4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $\sqrt{N_c P_v} \simeq 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³). Величина $U_{\text{инв}}$ для ($p-n$)-структуры на n -InSb взята из (⁷). Изменение $U_{\text{инв}}$ для ($p-n$)-перехода на одном материале при $T = \text{const}$ с концентрацией основных носителей в базе и с частотой переменного сигнала показано на рисунке вер-

тикальными линиями. Для ($p-n$)-перехода на основе сплава германия, содержащего 8% кремния и имеющего $\Delta E_g \approx 0,79$ в ($^{\circ}$), $U_{\text{нпв}} \approx 0,31$ в.

Линейная зависимость $U_{\text{нпв}}$ от ΔE_g , отсутствие влияния глубины залегания рекомбинационного центра на $U_{\text{нпв}}$, влияние освещения на величину $U_{\text{нпв}}$ позволяют утверждать, что в ($p-n$)-переходах (InSb, Ge, Si, InP, GaP) механизм возникновения и инверсии реактивности обусловлен

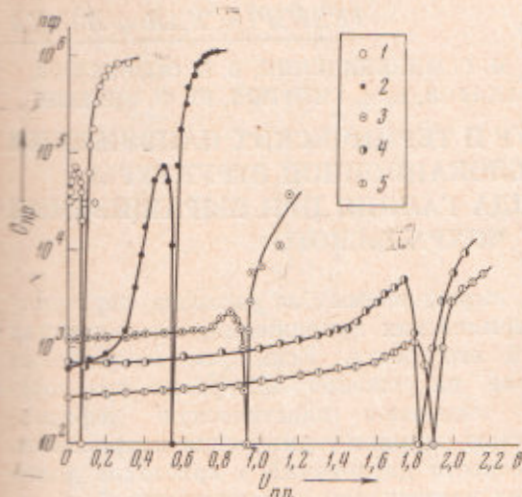


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость емкости от прямого смещения для $p-n$ -структур, созданных на основе различных полупроводниковых материалов: 1 — Ge, 2 — Si, 3 — InP, 4 — GaP (зел.), 5 — GaP (кр.) при 300°K и $f = 100$ кГц

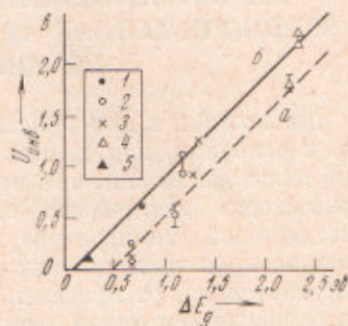


Рис. 2

Рис. 2. Связь между $U_{\text{нпв}}$ и шириной запрещенной зоны при 300 (а) и 77°K (б). 1 — Ge, 2 — Si, 3 — InP, 4 — GaP, 5 — InSb ($^{\circ}$) при 77°K и 250 кГц. Вертикальными линиями показан разброс в $U_{\text{нпв}}$ для образцов, созданных на материале с различным p и для измеренных при различных частотах малого переменного сигнала

инерционностью модуляции сопротивления некоторого слоя базы инжектированными носителями во время действия достаточно быстрого переменного сигнала (от ~ 1). Такая модуляция может наблюдаться уже при средних токах (≈ 30 ма/см 2), недостаточных еще для модуляции всего сопротивления базы.

Таким образом, инверсия реактивности имеет место во всех ($p-n$)-переходах, созданных на монокристаллических полупроводниках. Напряжение инверсии и его изменение с температурой и частотой переменного сигнала ($^{\circ}$) позволяют определить концентрацию основных носителей в базе, распределение потенциала вблизи него, диффузионную разность потенциалов и локальную температуру ($p-n$)-перехода. Авторы благодарны Б. М. Вуду за обсуждение и ценные замечания.

Физический институт
Академии наук АзербССР
Баку

Поступило
11 III 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 T. Ferle, O. Hayes, JRE Trans., ED-7, № 3, 330 (1959). 2 Л. И. Баранов, Радиотехника и электроника, 5, в. 6, 1002 (1960). 3 G. B. Abdullaev, E. A. Jafarova et al., Solid-State Electronics, 11, 233 (1968). 4 M. Gershenson, R. M. Mikuljak, J. Appl. Phys., 32, 1338 (1961). 5 Г. Б. Абдуллаев, Э. А. Искендер-заде и др., Изв. АН АзербССР, сер. физ.-техн. и матем. наук, № 4, 60 (1970). 6 D. G. Thomas, Brit. J. Appl. Phys., 2, № 2, 637 (1969). 7 В. В. Галаванов, Д. Н. Наследов, М. А. Рзаев, Радиотехника и электроника, 10, в. 3, 557 (1964). 8 Г. Б. Абдуллаев, Э. Я. Бекиров, Г. М. Мамедова, Тр. IV Всесоюз. совещ. по физическим явлениям в $p-n$ -переходах в полупроводниках, Одесса, 1971.