

Вольт-амперная характеристика $p-n$ -структур на основе непрерывного твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$

© А.С. Саидов, А.Ю. Лейдерман, Ш.Н. Усмонов[¶], К.Т. Холиков

Физико-технический институт им. С.В. Старбодубцева Академии наук Республики Узбекистан, 100084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 8 апреля 2008 г. Принята к печати 25 июня 2008 г.)

Исследованы вольт-амперные характеристики структур $p\text{-Si}-n\text{-(Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($0 \leq x \leq 0.01$) при различных значениях температуры. Обнаружено, что вольт-амперная характеристика таких структур имеет участок сублинейного роста тока с напряжением $V \approx V_0 \exp(JaW)$. Экспериментальные результаты объясняются на основе теории эффекта инжекционного обеднения. Показано, что подвижность неосновных носителей — дырок — уменьшается с ростом температуры.

PACS: 73.40.Lq, 81.05.Dz

В данной работе приводятся результаты исследований эпитаксиальных слоев непрерывного твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$. Эпитаксиальные слои были выращены по технологии, описанной в работе [1]. В вертикальной графитовой кассете укреплялись две подложки — верхняя и нижняя. Подложками служили кремниевые шайбы диаметром 20 мм и толщиной ~ 350 мкм, вырезанные из монокристаллического кремния p -типа проводимости с ориентацией (111) и с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Рост эпитаксиального слоя осуществлялся из ограниченного объема оловянного раствора—расплава в атмосфере очищенного палладием водорода. Состав раствора—расплава был получен на основе предварительных исследований системы Si—CdS—Sn и литературных данных [2–4]. Образцы выращивались при различных значениях параметров жидкофазной эпитаксии. Варьировались расстояние между верхними и нижними подложками, начало температуры кристаллизации и скорость охлаждения оловянного раствора—расплава. Эпитаксиальные слои с зеркальными поверхностями и с наилучшими параметрами получались при расстоянии между верхними и нижними подложками, равном 1 мм, температуре начала кристаллизации оловянного раствора—расплава 1150°C и скорости охлаждения подложки 1 град/мин. Выращенные пленки имели n -тип проводимости с удельным сопротивлением ~ 0.016 Ом·см и толщину 15–25 мкм.

Рентгеноструктурный анализ химического состава поверхности и скола выращенных эпитаксиальных слоев, проведенный на микроанализаторе „Jeol“ JSM 5910 NV-Japan, показывает, что распределение компонентов по поверхности пленки однородное и состав твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ по толщине слоя изменяется в пределах $x = 0-0.01$.

На основе непрерывного твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ были изготовлены структуры $p\text{-Si}-n\text{-(Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($x = 0-0.01$) с толщиной базового n -слоя $W \approx 25$ мкм (рис. 1). При исследовании к

структуре методом вакуумного напыления создавались омические контакты — сплошные с тыльной стороны и четырехугольные с площадью 4 мм² из серебра со стороны эпитаксиального слоя.

Исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных структур в прямом направлении, представленные на рис. 2 в полулогарифмическом масштабе. Измерения проводились в температурном диапазоне 20–190°C. Начальный участок ВАХ (до 0.5 В) хорошо аппроксимируется известной зависимостью Стафеева [5]:

$$J \propto e^{\frac{aV}{cKT}}, \quad (1)$$

где показатель экспоненты c , вычисленный из ВАХ, имеет значение $c \approx 9.4$, характерное для так называемого „длинного“ диода, т.е. $W/L_p > 1$, где W — длина базы, $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ — диффузионная длина неосновных носителей. Согласно теории В.И. Стафеева, показатель экспоненты c описывается выражением

$$c = \frac{2b + \text{ch}\left(\frac{W}{L}\right) + 1}{b + 1}, \quad (2)$$

где $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ — отношение подвижностей электронов и дырок.

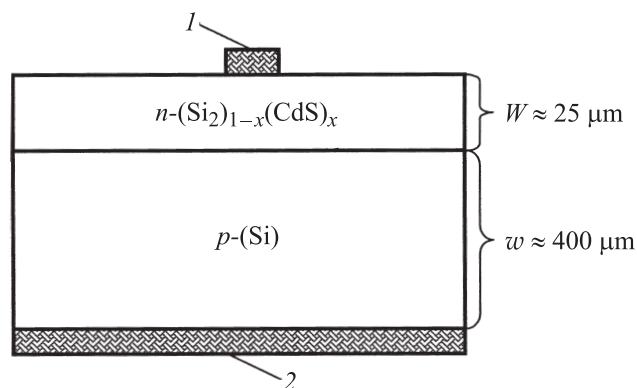


Рис. 1. Схема структуры $p\text{-Si}-n\text{-(Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($x = 0-0.01$). 1, 2 — омические контакты.

[¶] E-mail: Sh_usmonov@rambler.ru

Значения параметра a в зависимости от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	20	50	70	90	110	130	150	170	190
$a, \text{см}/\text{А}$	$4.5 \cdot 10^4$	$4.55 \cdot 10^4$	$4.6 \cdot 10^4$	$4.6 \cdot 10^4$	$4.7 \cdot 10^4$	$4.9 \cdot 10^4$	$5.2 \cdot 10^4$	$5.7 \cdot 10^4$	$5.7 \cdot 10^4$

Подвижность основных носителей, определенная методом Холла, составляла при комнатной температуре $\mu_n \approx 290 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Предполагая, что, как обычно, в материалах группы $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ подвижность дырок намного меньше подвижности электронов (см., например, [6]), для оценки принималось значение $\mu_p \approx 10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Учитывая, что в этом случае $b \approx 29$, из соотношения (2) можем найти отношение $W/L_p \approx 6.1$, которое действительно оказывается больше 1. Затем можно найти диффузионную длину неосновных носителей $L_p \approx 4.1 \text{ мкм}$. Это позволяет определить время жизни неосновных носителей $\tau_p = L_p^2/D_p$, которое получается равным $5.6 \cdot 10^{-7} \text{ с}$. Этот результат вполне согласуется с проведенными по релаксации фотопроводимости измерениями времени жизни основных носителей $\tau_n = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Из ВАХ, показанных на рис. 2, видно, что вслед за обычной экспоненциальной зависимостью на всех ВАХ, независимо от температуры, появляются протяженные сублинейные участки (в диапазоне от $V > 0.7$ до 3 В). По-видимому, эти участки ВАХ могут быть хорошо описаны в рамках теории так называемого „эффекта инжекционного обеднения“, впервые предсказанного теоретически в работе [7] и впоследствии наблюдавшегося на многих структурах, изготовленных из различных материалов (см., в частности, [8–10]). В случае этого эффекта ВАХ имеет весьма специфический характер и описывается закономерностью вида

$$V \approx V_0 e^{JaW}, \tag{3}$$

где

$$a = \frac{1}{2qD_pN} \tag{4}$$

— параметр, зависящий только от коэффициента диффузии неосновных носителей (т.е. от их подвижности, $D_p = (kT/q)\mu_p$) и концентрации глубоких примесей N , J — плотность тока. Одним из важнейших условий наблюдения сублинейного участка ВАХ (3) является требование

$$JaW > 2, \tag{5}$$

которое свободно выполняется при всех температурах (например, при $T = 20^\circ\text{C}$, $S = 0.2 \text{ см}^2$, $JaW \approx 5$).

Как следует из теории, появление такой ВАХ возможно только при встречных направлениях амбиполярной диффузии неравновесных носителей и их амбиполярного дрейфа, который в этом случае определяется инжекционной модуляцией заряда глубоких примесей (см. подробнее [11]). Используя выражение (3), можно определить

параметр a непосредственно из данных по ВАХ:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) S}{(I_2 - I_1)W}, \tag{6}$$

где S — площадь поперечного сечения, I — сила тока. Значения параметра a , найденные из ВАХ при различных температурах, приведены в таблице.

Как отмечалось выше, значение величины a позволяет определить концентрацию глубоких примесей N , ответственную за появление сублинейного участка ВАХ, которая составляет при комнатной температуре $N \approx 2.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Поскольку в исследуемом диапазоне температур эта концентрация вряд ли может изменить-

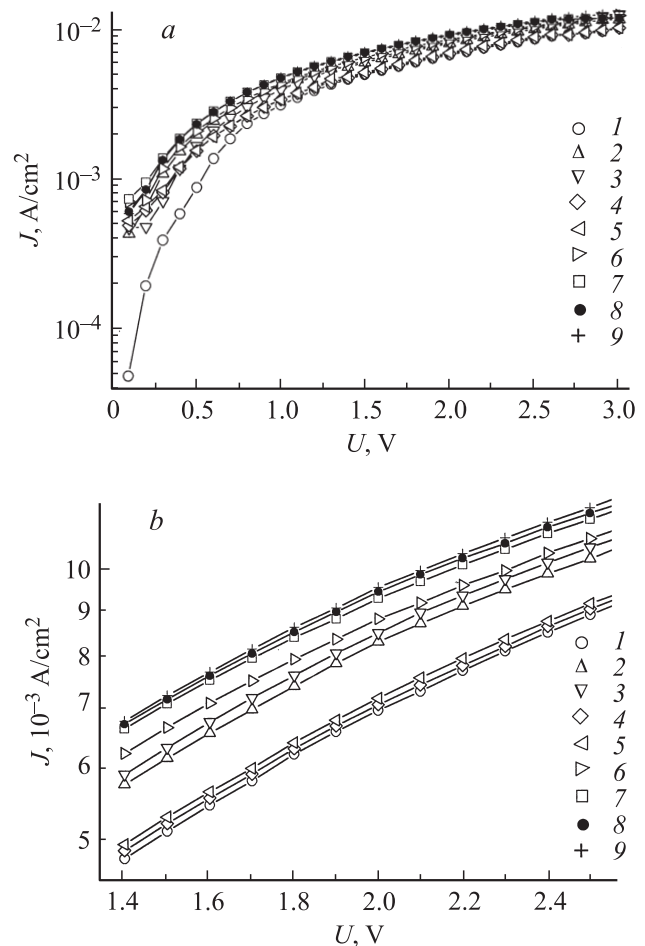


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры $p\text{-Si-n-(Si}_2\text{)}_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($x = 0-0.01$) в прямом направлении при различных температурах (а) и их сублинейные участки (б). $T, ^\circ\text{C}$: 1 — 20, 2 — 50, 3 — 70, 4 — 90, 5 — 110, 6 — 130, 7 — 150, 8 — 170, 9 — 190.

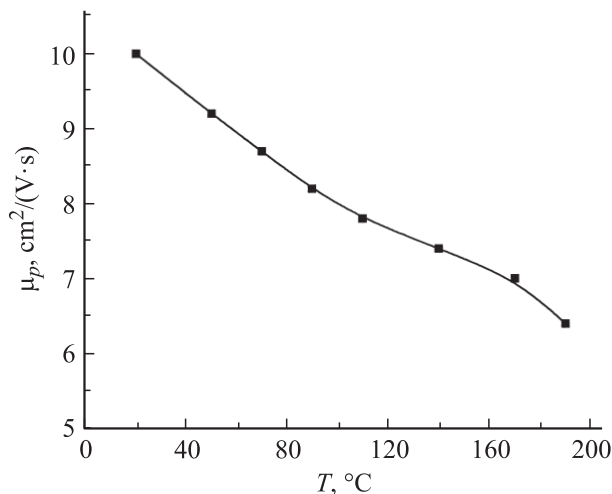


Рис. 3. Зависимость подвижности неосновных носителей тока в эпитаксиальном слое непрерывного твердого раствора $n-(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($x = 0-0.01$) от температуры, определенная из зависимости $a(T)$.

ся, можно предположить, что изменения $a(T)$ обусловлены изменениями подвижности неосновных носителей заряда с температурой. Используя данные таблицы, мы нашли зависимость подвижности дырок от температуры, которая представлена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что подвижность неосновных носителей в эпитаксиальном слое непрерывного твердого раствора $n-(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ ($x = 0-0.01$) падает с ростом температуры. Это, по-видимому, позволяет заключить, что в данном твердом растворе большую роль в механизме подвижности играет рассеяние носителей на ионизированных примесях.

Список литературы

- [1] A.S. Saidov, A.Sh. Razzakov, V.A. Risaeva, E.A. Koschanov. *Mater. Chem. Phys.*, **68**, 1 (2001).
- [2] В.М. Андреев, Л.М. Долгинов, Д.Н. Третьяков. *Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов* (М., Сов. радио, 1975).
- [3] М. Хансен, К. Андерко. *Структуры двойных сплавов* (М., Металлургиздат, 1962) т. II. [Пер. с англ.: M. Hansen, K. Anderko. *Constitution of binary alloys* (Toronto—London—N.Y., 1958) v. II].
- [4] А.С. Саидов, М.С. Саидов, Э.А. Кошчанов. *Жидкостная эпитаксия компенсированных слоев арсенида галлия и твердых растворов на его основе* (Ташкент, Фан, 1986).
- [5] В.И. Стафеев. *ЖТФ*, **28** (8), 1631 (1958).
- [6] В.И. Фистуль. *Физика и химия твердого тела* (М., Металлургия, 1995) т. I, II.
- [7] A.Yu. Leiderman, P.M. Karageorgiy-Alkalaev. *Sol. St. Commun.*, **27**, 339 (1976).
- [8] А.А. Абакумов, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, И.З. Каримова, П.И. Книгин, А.Ю. Лейдерман. *ФТП*, **10** (3), 486 (1976).

- [9] А.С. Саидов, А.Ю. Лейдерман, Б. Сапаев, С.Ж. Каражанов. *ФТП*, **27** (2), 256 (1993).
- [10] А.С. Саидов, А.Ю. Лейдерман, Б. Сапаев, С.Ж. Каражанов, Д.В. Сапаров. *ФТП*, **30** (6), 1036 (1996).
- [11] Э.И. Адирович, П.М. Карагергий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. *Токи двойной инжекции в полупроводниках* (М., Сов. радио, 1978).

Редактор Т.А. Полянская

Current-voltage characteristic of $p-n$ -structures on the base of continuous solid solution $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$

A.S. Saidov, A.Yu. Leyderman, Sh.N. Usmonov, K.T. Kholikov

Physicotechnical Institute,
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
100084 Tashkent, Uzbekistan

Abstract Current-voltage characteristics of $p\text{-Si-n}-(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{CdS})_x$ structures ($0 \leq x \leq 0.01$) have been researched at different temperatures. It has been come out that current-voltage characteristics of these structures have plot of type $V \approx V_0 \exp(JaW)$ with sublinear increasing current from voltage. That can be explained by theory of „injection depletion“ effect. It has been shown that mobility of holes decreases with temperature's increasing.