

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА Р-П ПЕРЕХОДОВ Se-CdSe, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ГЛУБОКИМИ ЛОВУЩКАМИ

Г. Б. АБДУЛЛАЕВ, М. А. ТАЛИБИ
Институт Физики АН Азербайджанской ССР, Баку

Й. КИШПЕТЕР, Я. ЛАНГ

Институт Экспериментальной Физики, Университет им. Йозеф Аттила, Сегед

(Поступило в Редакцию 15 ноября 1969 г.)

Исследованы реактивные свойства р-п переходов Se-CdSe. Определены концентрации ионизованных доноров и акцепторов в слое объемного заряда, а также толщина п-слоя. Показано, что теория Долега, позволяющая, при определенных условиях вычислять по емкостным измерениям параметры р-п перехода Se-CdSe, оказывается несостоятельной в описании явлений, обусловленных действием на некоторые явления в Se-CdSe глубоких энергетических ловушек в Se и CdSe.

Теорией Долега не объясняется переход емкостной реакции в индуктивную и частотная зависимость емкости при низких частотах и «аномальная» зависимости $1/C^2=f(U)$.

Основу р-п переходов Se-CdSe составляют широкозонные полупроводники Se и CdSe, в запрещенной зоне которых содержатся глубокие энергетические ловушки. Влияние этих ловушек на процессы, происходящие в р-п переходах Se-CdSe на базе селена чистотой 99,99999% изучено в [1].

В настоящей работе рассмотрены некоторые явления, обусловленные глубокими энергетическими ловушками в области объемного заряда Se-CdSe.

Измерялись элементы Se-CdSe, содержащие в слое объемного заряда примесь галоида и таллия.

Реактивные свойства изучались мостовым методом, при комнатной температуре, наложением на постоянное смещающее напряжение переменного сигнала < 20 мВ. Значение ионизованных акцепторов — n_A ; ионизованных доноров — n_D и толщина n — слоя l_{CdSe} вычислялись по кривой $1/C^2=f(U)$ применением соотношений (2):

$$\frac{d(1/C^2)}{dU} = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \frac{1}{n_A}, \quad (1)$$

$$\frac{d(1/C^2)}{dU} = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_D} \right), \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_0} = \frac{l_{CdSe}}{e\epsilon\epsilon_0 S} \left(1 + \frac{n_D}{n_A} \right), \quad (3)$$

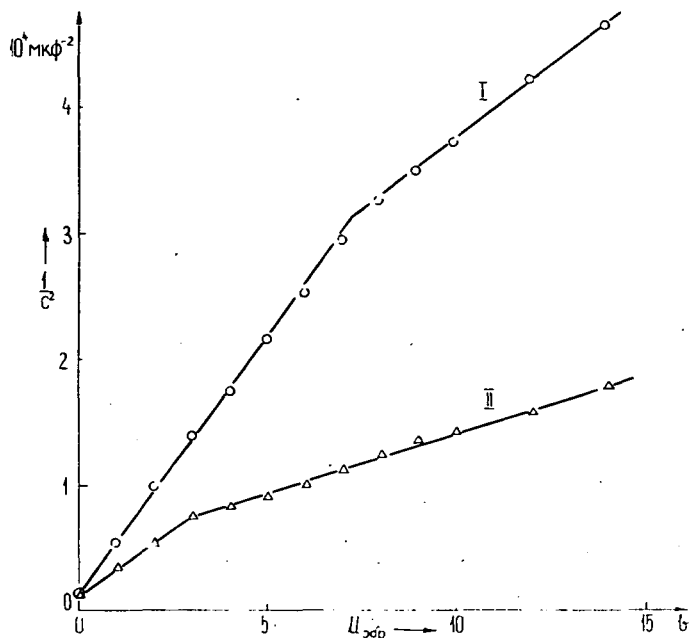


Рис. 1. Зависимость $1/C^2 = f(U_{обр})$ p-п переходов Se-CdSe, I асимметричный, II симметричных p-п переход

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-8}$ мкф/см — диэлектрическая постоянная вакуума, C_0 — величина емкости, соответствующая $U_{обр}$, при котором весь слой l_{CdSe} включается в объемный заряд перехода Se-CdSe.

Для исследований отбирались образцы с положительными наклонами обеих участков кривой (рис. 1) зависимости $1/C^2 = f(U_{обр})$.

Исследование емкости перехода выявило четкую пропорциональность обратного квадрата емкости приложенному смещению т. е. исследованные p-п переходы были резкими.

Изучались образцы двух групп (таблица): первая группа образцов с асимметричными p-п переходом ($n_d > n_A$) и вторая почти симметричным переходом Se-CdSe ($n_d \cong n_A$). Расчет n_A , n_d и l_{CdSe} производился по данным измерений при 20 кГц, когда емкость не зависит от частоты измери-

Таблица

Образец	$n_A, 10^{16} \text{см}^{-3}$	$n_d, 10^{16} \text{см}^{-3}$	$l_{CdSe}, \text{МК}$	
I.	№ 1	0,59	1,17	0,48
	№ 2	0,84	1,76	0,38
	№ 3	0,53	1,78	0,32
	Среднее значение	0,65	1,58	0,40
II.	№ 3	1,26	2,08	0,30
	№ 6	1,16	1,46	0,34
	№ 9	1,62	1,21	0,13
	Среднее значение	1,35	1,58	0,25

тельного сигнала. В связи с этим хотим отметить, что емкостные измерения выполненные в [3] на селеновых элементах при $\nu = 1592$ кГц могли бы внести значительную погрешность в результаты. Измеренные в [3] элементы Se-CdSe содержат в слое объемного заряда примесь таллия и галоида. Для таких элементов Se-CdSe, по крайней мере до $\nu = 5$ кГц, наблюдается резкая зависимость $C_{одр}$ от ν (рис. 2).

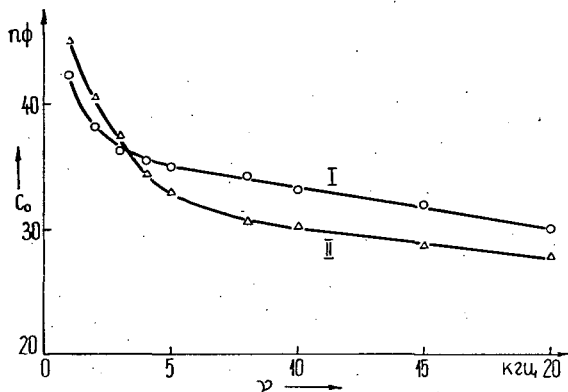


Рис. 2. Частотная зависимость емкости при комнатной температуре и напряжении $U=0$, I асимметричный, II симметричный p-n переход

учитывающее частотную зависимость емкости, экспериментально подтверждено для Ge и Si p-n переходов в [9].

Резкое увеличение емкости Se-CdSe при низких частотах (рис. 2) свидетельствует о том, что при приложении переменного напряжения внутри запирающего слоя появляется дополнительный сдвиг зарядов, с определенной инерционностью. Это может быть при наличии в слое объемного заряда ловушек, способных удержать с определенной силой электроны или дырки.

Дополнительный заряд, возникающий вследствие ионизации глубоких центров, может оказать существенное влияние на вид вольтамперной характеристики.

Влияние заряда глубоких центров может сказаться на величине емкости p-n перехода.

Исходя из изложенного и результатов [4] резкое увеличение емкости Se-CdSe при низких частотах (рис. 2) можно объяснить как следствие захвата носителей глубокими ловушками в слое объемного заряда, независимо от структуры (таблица) p-n перехода (симметричный или асимметричный).

Глубокие примеси, изменение заряда на которых происходит вследствие тепловых забросов, ударной ионизации и рекомбинационных процессов, играют роль фактора задержки в движении носителей, что в зависимости от условий дает положительный или отрицательный сдвиг фаз между током и напряжением.

Одним из таких проявлений действия ловушек является наблюдаемый в Se-CdSe [10—12] переход емкостной реакции в индуктивную. Это явление обнаруживается и на элементах обеих групп (рис. 3), исследованных в данной

Согласно Шоттки и Шпенке [5] ширина слоя объемного заряда, а следовательно величина эквивалентной емкости не зависят от частоты. Однако, в ряде работ [6—8] обнаружена зависимость емкости выпрямительного элемента от частоты.

В [8] получено теоретическое выражение комплексной проводимости p-n перехода для случая малого переменного сигнала, наложенного смещение в запирающем направлении. Теоретическое выражение [8],

работе, независимо от структуры p-p (таблица) перехода (симметричный или асимметричный).

В [3] для различных переходов селен-селенид металла, а в [13—15] для p-p переходов Se-CdSe обнаружено отклонение зависимости $1/C^2=f(U)$ от модели Долега [2]. По [13—14] меняя режим термообработки можно готовить p-p переходы Se-CdSe, в которых зависимость $1/C^2=f(U)$ представляется одной

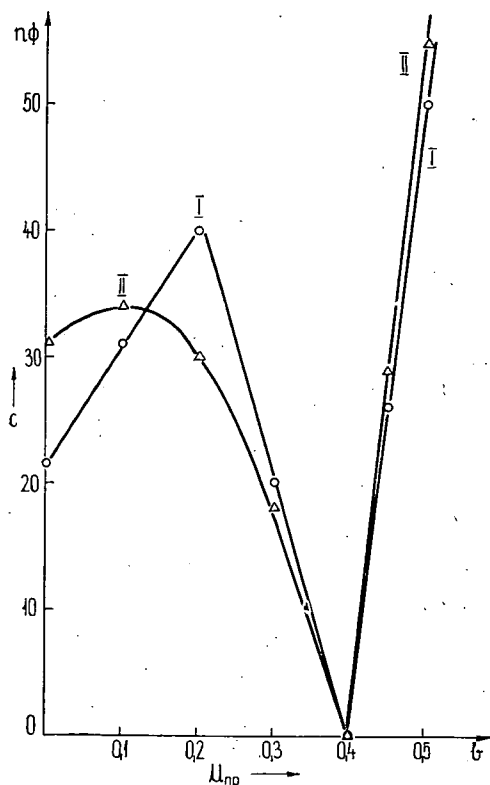


Рис. 3. Зависимость $C=f(U_{np})$ p-p переходов Se-CdSe, I асимметричный, II симметричный p-p переход

носителей тока и времени жизни. Теория Саа, Нойса и Шокли [18] построенная на основе рекомбинационной статистики Шокли и Рида [19] показала существенную роль генерации носителей тока в области объемного заряда кремниевых p-p переходов.

Концентрация глубоких ловушек нередко бывает сравнима с концентрацией мелких примесных уровней, определяющих тип проводимости. В подобных условиях пренебрежение зарядом ловушек требует особого рассмотрения.

В теории Долега [2] при выводе соотношений для вольтамперных характеристик для p-p гетероперехода Se-CdSe учёт энергетического уровня глубоких

прямой (соответствие модели Шоттки), двумя прямыми с положительными наклонами (модель Долега), либо отрицательным наклоном второго участка (отклонение от модели Долега).

Подобные отклонения $1/C^2=f(U)$ от модели Долега автор [3] объясняет образованием второго, встречно включенного перехода запирающего слоя у контакта селенид-металл. Для контактов металл-селенид, образующих вы выпрямляющих контакт такое объяснение, по-видимому, не вызывает сомнения. Однако им, по нашему мнению, нельзя объяснить наблюдаемые в [14—15] три вида зависимости $1/C^2=f(U)$ для одного и того же перехода Se-CdSe.

Рассмотрим другие возможные причины отклонения зависимости $1/C^2=f(U)$ от модели Долега.

В зависимости от внешних условий глубокие примесные уровни могут проявлять себя либо в качестве уровней прилипания, либо рекомбинационные центры [16—17] — ловушки для дырок и электронов.

Влияние глубоких примесных уровней на свойства p-p переходов не сводится только к изменению величин концентрации неосновных

ловушек осуществляется использованием выражения для рекомбинационного тока по Шокли-Риду [19].

Обычно при решении уравнения Пуассона $\frac{d}{dx}E = \frac{4\pi l}{\epsilon} \rho$ плотность объемного заряда в полупроводнике ρ считается либо постоянной, не зависящей от координат, либо предполагается изменение концентрации по глубине полупроводника, вследствие чего становится функцией x . Считается, что концентрация ионизованных примесей не зависит от напряженности электрического поля. Между тем ряд эффектов сильного поля — ударная ионизация примесей [20]. Эффект Френкеля и другие явления могут изменить концентрацию ионизованных примесей, т. е. привести к непосредственной зависимости плотности объемного заряда в полупроводнике от напряженности электрического поля. Учет такой связи может вызвать изменение вида зависимости поля в области объемного заряда полупроводника и размеров этой области от приложенного напряжения. Это в свою очередь должно повлиять на свойства полупроводниковых приборов [21].

По [22] для селеновых выпрямительных элементов выражение для обратного тока — $I_{обр}$ можно представить в виде:

$$I_{обр} = A \exp \left[-\frac{e\phi - f(E)}{kT} \right],$$

где A — некоторая постоянная, E — напряженность поля на р-п переходе, ϕ — энергия активации процесса образования неосновных носителей тока, которая зависит от наличия глубоких энергетических ловушек. В селеновых р-п переходах энергия активации этих ловушек 0,55—0,75 эв [20].

Выражение для емкости р-п переходе Se-CdSe в [2] получается из условия электронейтральности и решения уравнения Пуассона без учета уровня глубоких ловушек и возможного влияния напряженности электрического поля на степень активации глубоких ловушек. Если учесть, что отклонение зависимости $1/C^2 = f(U)$ от модели Долега относится к области высоких напряжений, когда n -слой включен в объемный заряд, то становится ясным влияние на это явление глубоких ловушек и напряженности электрического поля.

Литература

- [1] Абдуллаев, Г. Б., Э. И. Манафли, М. А. Талиби; Э. И. Манафли, М. А. Талиби, Б. М. Гулиева; М. А. Талиби, М. М. Алиев: В сборнике «Селен теллур и их применение». Издательство АН Азербайджанской ССР, Баку (1965).
- [2] Dolega, U.: Z. Phys. **167**, 46 (1962).; Z. Naturforsch. **18a**, 653 (1963).
- [3] Hempel, H. P.: Z. Angew. Phys. **22**, 190 (1967).
- [4] Kleinknecht, H., K. Seiler: Z. Phys. **139**, 599 (1954).
- [5] Shottky, W., E. Spenke: Vezöff. Siemens Werken **18**, 225 (1939).
- [6] Тучкевич, В. М., В. К. Субашиев: ЖТФ **17**, 177 (1947).
- [7] Лашкарев, В. Е.: ЖТФ **15**, 598 (1945).
- [8] Толыго, К. Б., Э. И. Раиба: ЖТФ **25**, 1335 (1955).
- [9] Лебедев, А. А., В. М. Тучкевич: В сборнике «Электронно-дырочные переходы в полупроводниках». Изд. АН Узбекской ССР, Ташкент 1962.
- [10] Zangolnikova, J. G., V. Šanderova, J. Kodeš: Čs. Čas. Fys. **16A**, 426 (1966).
- [11] Талиби, М. А., Э. Г. Мамедов, М. М. Алиев: Тезисы докладов Всесоюзного совещания по физическим явлениям в р-п переходах по полупроводникам, Тбилиси (1966).

- [12] *Талиби, М. А., Э. Г. Мамедов, М. М. Алиев*: ФТП. **1**, 1421 (1967).
 [13] *Kodeš, J., V. Šanderova*: Cs. Cas. Fys., **13**, (1963).
 [14] *Kučera, L., V. Šanderova*: Czech. J. Phys., **B19**, (1969).
 [15] *Lang, J., J. Kispéter and L. Gombay*: „Symposium on test methods and measurements of semiconductor devices”, Budapest, April 25—28 (1967).
 [16] *Калашиников, С. Г.*: ЖТФ **26**, 2 (1956).
 [17] *Бонч-Бруевич, В. Л.*: ЖТФ **28**, 1 (1958).
 [18] *Sah, C., R. Noyce, W. Shockley*: Proc. I. R. E. **45**, 1228 (1957).
 [19] *Shockley, W., W. Read*: Phys. Rev. **87**, 835 (1952).
 [20] *Манафли, Э. И., М. А. Талиби, Г. Б. Абдуллаев*: В сборнике «Физика p-n переходов», Издательство «Зинатне», Рига (1966).
 [21] *Авакянц, Г. М., В. И. Мурыгин, А. Тешабаев*: В сборнике «Электронно-дырочные переходы в полупроводниках», Издательство АН Узбекской ССР, Ташкент (1962).
 [22] *Фистуль, В. И., О. Б. Оржевский*: ФТТ **2**, 2214 (1963).

SOME FEATURES OF p-n HETEROJUNCTIONS
 DUE TO DEEP TRAPS IN Se-CdSe

By

G. B. Abdullaev, M. A. Talibi, J. Kispéter, J. Lang

Reactive behaviour of p-n heterojunctions in Se-CdSe has been investigated. Concentrations of ionized donors and acceptors in the space charge layer of the n-layer have been determined. It could be shown, that Dolega's theory, which allows to calculate the parameters of p-n junctions in Se-CdSe on the basis of capacitance measurements under certain conditions, proves insufficient for describing some phenomena produced in Se-CdSe by deep traps in Se and CdSe. Dolega's theory does not explain the change of capacitive reactivity into inductive one, the frequency dependence of capacity at low frequencies, and the anomalous dependence of $1/C^2$ on U.