

Зависимость емкости германиевых $p^+ - p$ -переходов от тока в области температур 290–330 К

© Н.А. Шеховцов[†]

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
61077 Харьков, Украина

(Получена 14 апреля 2008 г. Принята к печати 25 июня 2008 г.)

Исследована зависимость дифференциальной емкости от тока германиевых $p^+ - p$ -переходов с удельным сопротивлением p -области 45, 30 и 10 Ом·см в области температур 290–350 К. Показано, что характер зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от тока изменяется при увеличении температуры перехода. При температуре 290 К емкость с ростом обратного тока уменьшается и изменяет знак с положительного на отрицательный, а с ростом прямого тока увеличивается. При температуре 330 К емкость с ростом обратного тока уменьшается до минимума с положительным значением, а с ростом прямого тока изменяет знак на отрицательный. При температуре 310 К емкость $p^+ - p$ -перехода может изменять знак с положительного на отрицательный с ростом прямого и обратного тока. Полагается, что положительная и отрицательная емкость $p^+ - p$ -перехода обусловлена изменением заряда в области перехода внешним напряжением.

PACS: 73.40.Lq

1. Введение

Переходы $p^+ - p$ и $n^+ - n$ ($h - l$ -переходы) используются в диодах с двойной инжекцией на одном из контактов, в биполярных транзисторах на базовом контакте, в униполярных транзисторах на контактах истока и стока, в детекторах СВЧ излучения на горячих носителях заряда и в микроэлектронных схемах.

Влияние $h - l$ -переходов на характеристики и параметры полупроводниковых приборов определяется инжекционными и емкостными свойствами этих переходов. Влияние $h - l$ -переходов на квазинейтральную слабо легированную область полупроводника экспериментально исследовалось в работах [1–3]. Процессы в области $h - l$ -переходов изучались в работах [4–12]. Машинный расчет емкости $p^+ - p$ -перехода на основе расширенной теории Ганна [4] в работе [13] дал очень большое значение емкости, которое экспериментально не подтверждено. В работе [12] теоретически показано, что дифференциальная емкость с увеличением обратного напряжения на переходе изменяет знак с положительного на отрицательный, а с ростом прямого напряжения увеличивается. Интерес к исследованию отрицательной емкости переходов полупроводник–полупроводник и контактов металл–полупроводник определяется возможностью использования их индуктивных свойств в интегральных микросхемах [14].

В связи с этим исследовалась зависимость дифференциальной емкости от тока германиевых $p^+ - p$ -переходов с удельным сопротивлением p -области $\rho_p = 45, 30$ и 10 Ом·см в интервале температур $T = 290 - 350$ К.

Точное измерение падения напряжения на области $p^+ - p$ -перехода и на квазинейтральной p -области затруднительно. Прямой и обратный токи через $p^+ - p$ -переход

измеряются с высокой точностью. Поэтому измерялась зависимость емкости $p^+ - p$ -перехода от тока.

Показано, что емкость может изменять знак с положительного на отрицательный при увеличении обратного и прямого тока через переход. Показано, что характер зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от тока определяется его температурой. В области температур 290–300 К емкость $p^+ - p$ -перехода с ростом обратного тока изменяет знак с положительного на отрицательный или уменьшается и остается положительной, а с ростом прямого тока увеличивается. В области температур 330–350 К емкость с ростом обратного тока уменьшается и остается положительной, а с увеличением прямого тока уменьшается и изменяет знак с положительного на отрицательный. Показано, что на характер зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от тока влияет концентрация акцепторов в p -области.

2. Методика эксперимента

Для изготовления исследуемых $p^+ - p$ -переходов использовались пластины германия p -типа проводимости, плоскость которых совпадала с кристаллографической плоскостью (111). Пластины шлифовались, полировались механически и химически в травителе СР-4, промывались в деионизованной воде и сушились. Переходы $p^+ - p$ получались вплавлением индия в пластинки с размерами $1.5 \times 1.5 \times 0.2$ мм в атмосфере водорода при 550°C . Пластинки с $p^+ - p$ -переходами приплавлялись к никелевому кристаллодержателю индием в атмосфере водорода при 500°C . После сварки кристаллодержателя с корпусом и изготовления вывода от p^+ -области $p^+ - p$ -переходы травились в растворе $96\% \text{H}_2\text{O} + 4\% \text{H}_2\text{O}_2$, промывались деионизованной водой, сушились и покрывались защитным лаком. Диаметр $p^+ - p$ -переходов был 0.7 мм. Отсутствие при сплавлении

[†] E-mail: shekhov@isc.kharkov.ua

индия золота, которое улучшает плоскостность границы раздела p^+ - и p -областей, исключало существенное влияние центров рекомбинации на зависимость емкости p^+-p -перехода от тока.

Зависимости емкости и проводимости диодов с p^+-p -переходом от тока регистрировались измерителем полных проводимостей низкочастотного типа Л2-7 на частоте 465 кГц. Полу период напряжения для измерения емкости p^+-p -перехода значительно превышал время дрейфа дырок через квазинейтральную p -область. Поэтому измеряемая емкость не зависела от частоты. Полагалось, что влиянием второго p^+-p -перехода на зависимость емкости от тока исследуемого перехода можно пренебречь, так как площадь исследуемого перехода значительно меньше площади второго перехода.

Зависимость проводимости диода с p^+-p -переходом от обратного и прямого тока позволяла сделать вывод об изменении концентрации свободных носителей заряда в квазинейтральной p -области. Разное удельное сопротивление p -области p^+-p -перехода давало возможность установить влияние концентрации неподвижных ионов акцепторов на зависимость емкости перехода от тока. Изменение температуры диода с p^+-p -переходом от 290 до 330 К позволяло исследовать влияние соотношения концентраций термодинамически равновесных дырок и электронов в p -области на зависимость емкости перехода от тока.

3. Результаты эксперимента

Зависимости емкости (C) от тока (J) p^+-p -переходов с разным удельным сопротивлением p -области ρ_p при разных температурах (T) показаны на рис. 1, 2, 3.

Характерной особенностью зависимости $C(J)$ p^+-p -перехода с $\rho_p = 45 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 310 \text{ К}$ является изменение знака емкости с положительного на отрицатель-

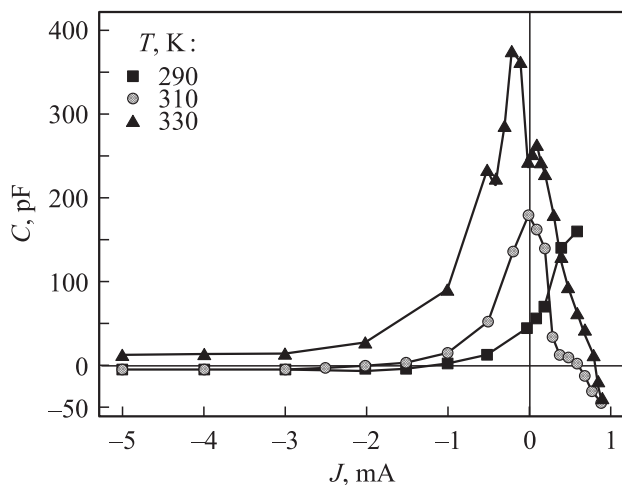


Рис. 1. Зависимость емкости C от тока J p^+-p -перехода с удельным сопротивлением p -области $45 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в области температур $T = 290\text{--}330 \text{ К}$.

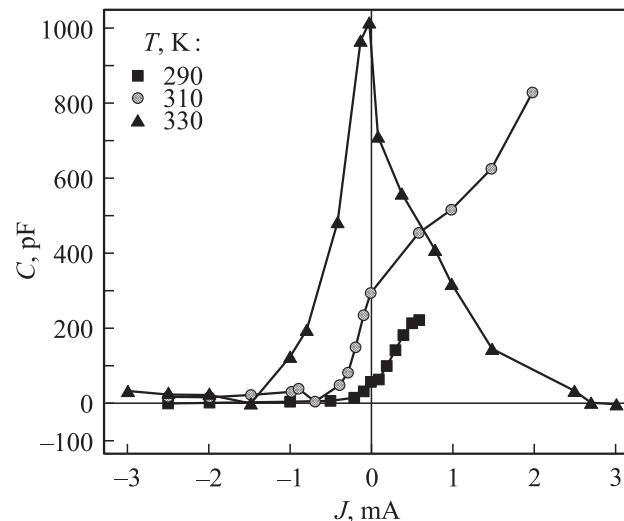


Рис. 2. Зависимость емкости C от тока J p^+-p -перехода с удельным сопротивлением p -области $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в области температур $T = 290\text{--}330 \text{ К}$.

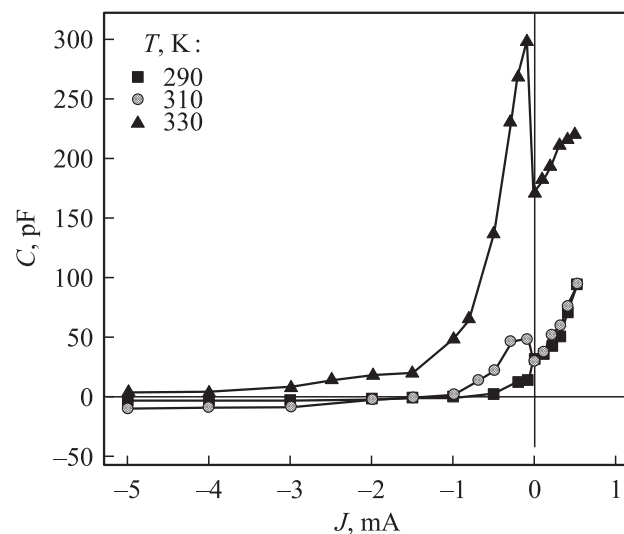


Рис. 3. Зависимость емкости C от тока J p^+-p -перехода с удельным сопротивлением p -области $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в области температур $T = 290\text{--}330 \text{ К}$.

ный при увеличении обратного и прямого тока (рис. 1). Проводимость p^+-p -диодов с ростом прямого тока увеличивается, а с ростом обратного тока уменьшается. Увеличение проводимости диодов определяется накоплением неравновесных пар электрон–дырка в p -области в процессе инжекции дырок p^+-p -переходом, а уменьшение проводимости диодов определяется эксклюзией носителей заряда в p -области. Вторая особенность зависимости $C(J)$ p^+-p -перехода — это изменение ее характера при изменении температуры перехода (рис. 1, 2, 3).

При $T = 290 \text{ К}$ емкость p^+-p -переходов с ростом тока инжекции увеличивается (рис. 1, 2, 3). Однако в области более высоких температур, $T = 310\text{--}330 \text{ К}$, с рос-

том тока инжекции емкость уменьшается и становится отрицательной (рис. 1, 2). Температура, при которой происходит изменение знака емкости, с уменьшением удельного сопротивления p -области увеличивается. В $p^+ - p$ -переходах с $\rho_p = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ уменьшение положительной емкости с ростом тока инжекции происходит при температурах $T \gtrsim 350 \text{ К}$.

Зависимость емкости $p^+ - p$ -перехода от обратного тока при $T = 290 \text{ К}$ характеризуется изменением знака емкости с положительного на отрицательный (рис. 1, 3) или уменьшением емкости до минимума с положительным значением емкости (рис. 2). Увеличение температуры до 330 К трансформирует зависимость с изменением знака емкости в зависимость с минимумом положительной емкости (рис. 1, 3).

С увеличением температуры $p^+ - p$ -перехода от 290 до 330 К при токе, равном нулю, емкость увеличивается. При повышении температуры на начальном участке зависимости емкости от обратного тока появляется максимум (рис. 1, 3). На начальном участке зависимости проводимости $p^+ - p$ -диода от обратного тока с увеличением температуры также появляется максимум. При токе $p^+ - p$ -перехода, равном нулю, увеличение емкости с ростом температуры может быть незначительным (рис. 2).

Третья особенность зависимости $C(J)$ — это уменьшение емкости C с ростом прямого и обратного тока J . Она наблюдается в $p^+ - p$ -переходах с $\rho_p = 45 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при температурах $T \geq 310 \text{ К}$, а в $p^+ - p$ -переходах с $\rho_p = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при температурах $T \geq 330 \text{ К}$.

Также отметим, что изменение характера зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от тока при увеличении температуры происходит без существенного изменения интервала тока (рис. 1, 2, 3).

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемые особенности зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от тока в области температур $290 - 330 \text{ К}$ дают основание полагать, что емкость независимо от ее знака определяется процессами в области пространственного заряда (ОПЗ) перехода.

По определению, дифференциальная емкость $p^+ - p$ -перехода, в котором практически вся ОПЗ расположена в p -области, запишется в виде [12]

$$C = \frac{dQ}{d(U_k \mp U)} = \frac{dQ/dU}{d(U_k \mp U)/dU} = \mp \frac{dQ}{dU}, \quad (1)$$

где Q — заряд ОПЗ, U_k — контактная разность потенциалов, U — внешнее напряжение; знак минус соответствует прямому, а знак плюс обратному включению перехода; dQ — изменение величины заряда Q при изменении внешнего напряжения на dU . Формула (1) отличается от формулы емкости в [15] только знаком минус для прямого включения. Учет знаков в (1) для разных полярностей включения перехода дает

возможность определить знак емкости при известном распределении заряда в ОПЗ $p^+ - p$ -перехода [12].

При обеих полярностях включения перехода $dQ > 0$, так как U увеличивается от нуля до $U < U_k$ при прямом включении и до $U > U_k$ при обратном включении. Изменение заряда $dQ > 0$ означает, что заряд Q увеличивается, $dQ = 0$ — остается неизменным, а $dQ < 0$ — уменьшается. Отсюда следует, что знак изменения заряда dQ определяет знак емкости перехода. Таким образом, отрицательная емкость $p^+ - p$ -перехода, как и его положительная емкость, может быть образована изменением заряда в ОПЗ при изменении напряжения на переходе.

Это дает основание анализировать возможность формирования зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от тока, температуры и удельного сопротивления p -области на основе формулы (1). Особенностью зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от обратного тока является изменение знака емкости с положительного на отрицательный в области температур $290 - 310 \text{ К}$ (рис. 1, 3).

Из (1) следует, что при обратном включении $p^+ - p$ -перехода его емкость положительна при $dQ > 0$ и отрицательна при $dQ < 0$. С увеличением обратного напряжения ОПЗ становится шире. При уменьшении заряда Q в ОПЗ перехода увеличение его разности потенциалов возможно за счет распределения заряда по более широкой области перехода. В этом случае $dQ < 0$ и $C < 0$. Таким образом, в зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от обратного тока за участком с $dQ > 0$ и $C > 0$ может следовать участок с $dQ < 0$ и $C < 0$ (рис. 1, 3).

С увеличением температуры $p^+ - p$ -перехода до 330 К зависимость емкости от обратного тока с изменением знака емкости сменяется зависимостью с изменением емкости до минимума с положительным значением (рис. 1, 3). Влияние температуры на зависимость емкости от обратного тока можно объяснить изменением соотношения заряда дырок и заряда электронов в ОПЗ. С увеличением температуры $p^+ - p$ -перехода в p -области увеличивается концентрация термически равновесных пар электрон-дырка. Это изменяет величину заряда дырок, величину заряда электронов и соотношение величин этих зарядов в ОПЗ. При этом в p -области увеличение концентрации пар электрон-дырка за счет тепловой генерации преобладает над уменьшением их концентрации за счет эксклюзии носителей заряда. Поэтому увеличение обратного напряжения на $p^+ - p$ -переходе не может уменьшить концентрации электронов и дырок в p -области до значений, при которых $dQ < 0$ и $C < 0$. В результате этого с ростом обратного напряжения емкость $p^+ - p$ -перехода уменьшается до минимума с положительным значением.

Зависимость емкости $p^+ - p$ -перехода от прямого тока при $T = 290 \text{ К}$ характеризуется увеличением положительной емкости с ростом тока (рис. 1–3). С увеличением прямого напряжения на $p^+ - p$ -переходе изменение заряда в ОПЗ вызвано уменьшением заряда

дырок за счет уменьшения ширины ОПЗ и увеличением заряда дырок за счет изменения распределения их концентрации, а также увеличением заряда электронов за счет роста их концентрации в квазинейтральной p -области. При $T = 290$ К процесс уменьшения заряда дырок преобладает над процессом увеличения их заряда. Поэтому $dQ < 0$ и в соответствии с (1) $C > 0$. С ростом прямого напряжения и тока $p^+ - p$ -перехода увеличиваются отрицательное значение изменения заряда dQ и положительная величина емкости C .

Особенностью зависимости емкости $p^+ - p$ -перехода от прямого тока является изменение ее характера при увеличении температуры перехода. С увеличением температуры от 290 до 330 К зависимость, характеризуемая увеличением емкости с ростом прямого тока, сменяется зависимостью с изменением знака емкости с положительного на отрицательный (рис. 1, 2). С уменьшением удельного сопротивления p -области увеличивается температура, при которой изменяется характер зависимости. В $p^+ - p$ -переходах с $\rho_p = 10$ Ом · см зависимость емкости от прямого тока с увеличением емкости при $T = 290$ К сменяется зависимостью с уменьшением емкости при $T \gtrsim 350$ К. Это показывает, что зависимость емкости от прямого тока с изменением знака емкости формируется в $p^+ - i$ -переходе с высокой концентрацией собственных носителей заряда $p_i = n_i$. В ОПЗ такого $p^+ - i$ -перехода с ростом прямого напряжения заряд электронов непрерывно увеличивается, а преобладание процесса уменьшения заряда дырок сменяется преобладанием процесса увеличения заряда дырок. Поэтому на начальном участке $dQ < 0$ и в соответствии с (1) $C > 0$. При равенстве увеличения заряда дырок и увеличения заряда электронов изменение заряда Q в ОПЗ $dQ = 0$ и емкость $C = 0$. При дальнейшем увеличении прямого напряжения увеличение заряда дырок преобладает над увеличением заряда электронов. При этом увеличивается изменение заряда $dQ > 0$ и значение емкости $C < 0$.

5. Заключение

Таким образом, изменение заряда дырок и заряда электронов в ОПЗ $p^+ - p$ -перехода внешним напряжением формирует зависимость емкости от тока. Характер зависимости емкости от тока определяется концентрацией собственных носителей заряда в p -области и изменяется с изменением температуры перехода.

Полученные результаты исследования $p^+ - p$ -переходов показывают, что выбором параметров p -области можно обеспечить увеличение отрицательной емкости с ростом обратного и прямого тока. Малая величина напряжения на $p^+ - p$ -переходе и низкая плотность тока в области отрицательных значений емкости показывают возможность использования $p^+ - p$ -переходов в качестве индуктивности в интегральных микросхемах.

Список литературы

- [1] Дж. Артур, В. Бардсли, М. Браун, А. Гибсон. *Проблемы физики полупроводников* (М., Изд-во иностр. лит., 1957) с. 205.
- [2] Р. Брэй. *Проблемы физики полупроводников* (М., Изд-во иностр. лит., 1957) с. 221.
- [3] J.B. Arthur, A.P. Gibson, J.B. Gunn. Proc. Phys. Soc., **В69** (7), 705 (1958).
- [4] J.B. Gunn. J. Electron. Control, **4** (1), 17 (1958).
- [5] Э.Д. Прохоров, Н.А. Шеховцов, А.Д. Прохоров. РЭ, **9** (12), 2174 (1964).
- [6] Э.Д. Прохоров, Н.А. Шеховцов, А.Д. Прохоров. РЭ, **9** (11), 2014 (1964).
- [7] Л.И. Баранов, В.Б. Гаманюк, Д.А. Усанов. РЭ, **13** (8), 1434 (1968).
- [8] В.Б. Гаманюк, Д.А. Усанов. РЭ, **15** (3), 637 (1970).
- [9] Л.И. Баранов, В.Б. Гаманюк, Д.А. Усанов. *Физика полупроводников и полупроводниковая электроника* (Саратов, Изд-во Саратов. ун-та, 1970) вып. 3, с. 8.
- [10] В.С. Елисеев, А.В. Зеленцов. Электрон. техн., сер. 3, № 1, 49 (1989).
- [11] G. Anant, A. Sabnis. J. Sol. St. Electron., **22** (7), 667 (1979).
- [12] Н.А. Шеховцов. Радиофизика и электроника (Сб. тр. ИРЭ НАНУ, Харьков), **5** (1), 147 (2000).
- [13] Р.И. Гарисон, Дж. Цукер. Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, **54** (4), 157 (1966).
- [14] Н.А. Поклонский, С.В. Шпаковский, Н.И. Горбачук, С.Б. Ластовский. ФТП, **40** (7), 824 (2006).
- [15] W. Shockley. Bell Syst. Tech., **28** (3), 435 (1949).

Редактор Л.В. Шаронова

Dependence of capacitance on current for germanium $p^+ - p$ junctions in the 290–330 K temperature range

N.A. Shekhovtsov

V.N. Karazin Kharkov National University,
61077 Kharkov, Ukraine

Abstract A dependence of differential capacitance of germanium $p^+ - p$ junctions, with 45, 30 and 10 $\Omega \cdot \text{cm}$ resistivity of p -region, on current was investigated in the 290–330 K temperature range. It was shown, that a character of $p^+ - p$ junction capacitance dependence upon current changed with temperature increase. At 290 K, the $p^+ - p$ junction capacitance decreased with reverse current growth and changed the sign from positive to negative, but it increased as forward current increased. At 330 K the capacitance decreased with increase of reverse current, up to minimal positive magnitude, but changed the sign from positive to negative with increase of forward current. At 310 K, a $p^+ - p$ junction capacitance can change the sign from positive to negative under an increase of forward and reverse currents. It seems, that positive and negative capacitance of $p^+ - p$ junction is created by means of a charge changing in junction region under voltage.