

Емкостные измерения в случае сильной зависимости последовательного сопротивления базы диода от приложенного напряжения

© А.А. Лебедев, А.А. Лебедев, Д.В. Давыдов

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

(Получена 22 июня 1999 г. Принята к печати 28 июня 1999 г.)

Проведено исследование эпитаксиально-диффузионных $6H$ -SiC-диодов с наличием в базе высокоомной прослойки, сопротивление которой изменялось при включении диода в прямом направлении. Показано, что несмотря на отсутствие обычных признаков влияния последовательного сопротивления (независимость емкости от частоты и малая величина емкостной отсечки), емкостные измерения в таких структурах могут быть некорректны.

Введение

В последние 10–15 лет емкостные методы (емкостная спектроскопия) активно разрабатывались и применялись для исследования различных полупроводников и полупроводниковых приборов. Можно сказать, что емкостная спектроскопия это определение параметров материала путем регистрации изменения емкости p - n -структуры или диода Шоттки под воздействием разных факторов (освещение, температура, приложенное напряжение) или их комбинации. К основным преимуществам данных методов можно отнести высокую чувствительность; наличие единой теории при работе с различными полупроводниковыми материалами; возможность исследовать как приборы, так и исходные полупроводниковые материалы; неразрушающее воздействие на исследуемый материал.

Однако емкостные методы, как и любые другие, имеют некоторые ограничения их применимости. Одним из таких ограничений является большое последовательное сопротивление (R_b) исследуемого образца. Вопрос о влиянии R_b на емкостные измерения неоднократно исследовался в литературе [1–5]. Однако в них предполагалось, что величина R_b в ходе измерений не изменялась. В настоящей работе были исследованы p - n -структуры, в которых величина R_b сильно зависела от приложенного напряжения.

Образцы

В работе были исследованы эпитаксиально-диффузионные $6H$ -SiC p^+ - n -структуры (SiC(B)) [6,7], полученные методом сублимационной эпитаксии. В данные структуры, после создания p - n -перехода сублимацией, через p^+ -эмиттер проводилась импульсная диффузия бора. Это использовалось для увеличения напряжения объемного пробоя и снижения вероятности поверхностного пробоя. После легирования бором в SiC образуется два типа глубоких акцепторных центров: мелкий уровень бора ($E_v + 0.35$ эВ) и D -центр ($E_v + 0.58$ эВ) [8,9].

Более глубокий из них является эффективной ловушкой для дырок и центром — активатором люминесценции в $6H$ -SiC, максимум излучения которой лежит в желтой области видимого спектра (2.14 эВ) [10]. Однако компенсация базовой области акцепторными центрами бора увеличивала также и последовательное сопротивление диода.

Эксперимент

Хотя условия диффузии для всех серий образцов были одинаковы, изначальный разброс в уровне легирования n -базы приводил к некоторому отличию свойств полученных эпитаксиально-диффузионных структур. Большинство исследовавшихся структур имели вольт-фарадные характеристики, близкие к представленным на рис. 1 (диод 7). Вблизи металлургической границы p - n -перехода (участок A) в базе наблюдался профиль распределения легирующей примеси, связанный с компенсацией базовой области за счет диффузии

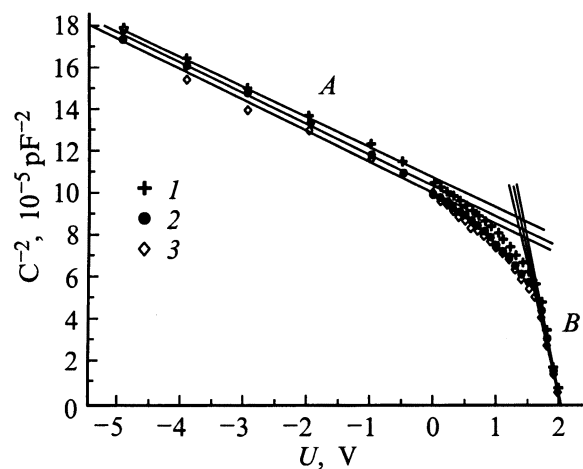


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики диода 7, полученные при различных частотах измерения емкости f , кГц: 1 — 100, 2 — 10, 3 — 1.

атомов бора. В глубине базовой области (участок *B*) наблюдалось равномерное распределение примесей и величина $N_d - N_a$ равнялась этой величине, определенной в слое до диффузии бора. На некоторых образцах наблюдалась также слабая зависимость измеряемой емкости от частоты.

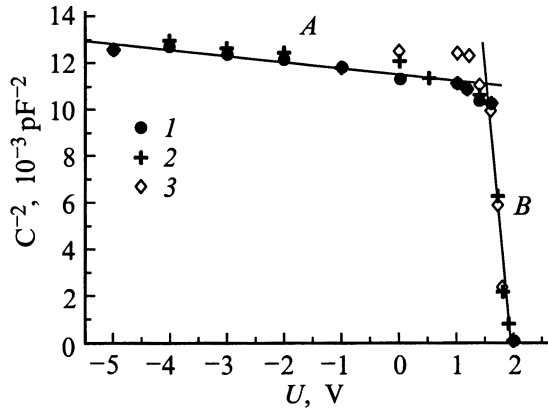


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики диода 15, полученные при различных частотах измерения емкости f , кГц: 1 — 10, 2 — 3, 3 — 1.

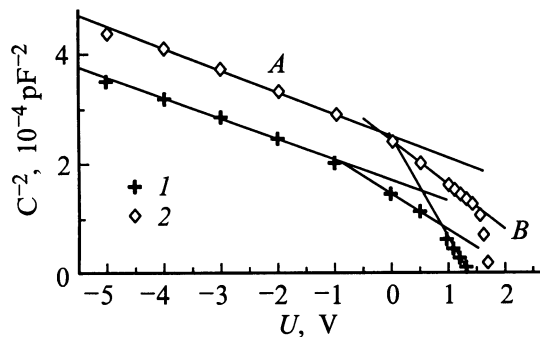


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики диода 15, измеренные при температурах образца T , °C: 1 — 300, 2 — 150. Частота измерения емкости $f = 10$ кГц.

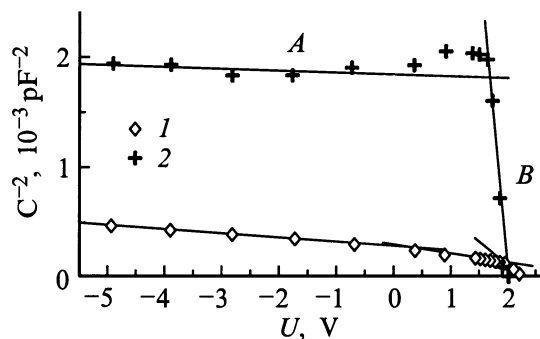


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики диода 1, полученные при температуре образца $T = 150^\circ\text{C}$ и при частотах измерения емкости f , кГц: 1 — 10, 2 — 100.

Величина $N_d - N_a$ (см^{-3}), определенная из двух разных участков вольт-фарадной характеристики

Участки $C-U$ -характеристики	Температура, °C			
	25	150	300	
	$f = 10$ кГц	$f = 100$ кГц	$f = 100$ кГц	$f = 10$ кГц
<i>B</i>	$6.3 \cdot 10^{13}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	$8.8 \cdot 10^{13}$	$9.7 \cdot 10^{15}$
<i>A</i>	$8.5 \cdot 10^{15}$	$4.4 \cdot 10^{16}$	$4.5 \cdot 10^{17}$	$4.8 \cdot 10^{16}$

Кроме того, были обнаружены зависимости другого вида (см. рис. 2, диод 15). $C-U$ -характеристики данных образцов имели два ярко выраженных участка, величина $N_d - N_a$ для которых отличалась более чем на 2 порядка (см. таблицу). При этом величина измеряемой емкости (C_M) не зависела от частоты вплоть до минимальных значений используемых частот ($f = 1$ кГц). Другой особенностью данных структур было резкое появление желтой электролюминесценции при напряжениях, соответствующих границе двух участков $C-U$ -характеристики, т.е. $U \approx 1.5$ В.

Хотя $C-U$ -характеристики образцов, подобных диоду 15, не обладали, согласно [3,4], явными признаками нарушения условия отсутствия зависимости $C_M = f(\omega)$ и имели "нормальную" величину емкостной отсечки ($U_C < 3$ В), рассчитанный из них профиль распределения примесей выглядел странным. Во-первых, трудно было ожидать столь резкое изменение концентрации в результате диффузии. Во-вторых, значение концентрации $N_d - N_a$ вблизи $p-n$ -перехода составляло $N_d - N_a \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что было очень сложно получить за счет компенсации изначального эпитаксиального слоя с концентрацией $N_d - N_a \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В-третьих, значение $N_d - N_a$ в глубине базовой области (участок *B*) было почти на порядок меньше, чем в слое до проведения диффузии.

Если наблюдаемая вольт-фарадная (ВФХ) характеристика была все-таки искажена большой величиной R_b , то можно было ожидать, что с увеличением температуры ВФХ будет изменяться, так как из-за значительной величины энергии ионизации примеси в SiC величина R_b с ростом температуры уменьшается. Поэтому были проведены измерения $C-U$ -характеристик диода 15 в диапазоне температур до 300°C (см. таблицу и рис. 3). Как видно из рисунка, с ростом температуры увеличивалась измеряемая величина $N_d - N_a$, а профиль распределения примеси становился все более пологим и все более похожим на обычное диффузионное распределение.

При увеличении частоты f до значения 100 кГц измеряемая при $T = 150^\circ\text{C}$ $C-U$ -характеристика становилась полностью подобной $C-U$ -характеристике, измеренной с меньшим значением f при комнатной температуре (рис. 4). Таким образом было показано, что исследованные образцы имеют значительную величину R_b и проведенные при комнатной температуре измерения емкости были некорректны.

Обсуждение результатов

Как правило, в измерительных установках используется параллельная эквивалентная схема замещения емкости (рис. 5, *a*). В случае, если величина R_b значительна, обычно эквивалентную схему диода представляют как показано на рис. 5, *b*. Во время эксперимента мы фиксируем значение C_M , которое легко выразить через параметры эквивалентной схемы:

$$C_M = \frac{C_d}{(1 + R_b/R_d) + \omega^2 R_b^2 C_d^2}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$, C_d — емкость исследуемого диода. Было показано, что корректные измерения возможны в диапазоне частот и последовательных сопротивлений, когда имеет место соотношение

$$(R_b \omega C_d^2) \ll 1. \quad (2)$$

В работах [3,4] было также показано, что характерным признаком нарушения условия (2) является появление зависимости величины измеряемой емкости от частоты, приводящее к увеличению емкостной отсечки U_C на измеряемой зависимости $C_M^{-2} = f(U)$, а затем уменьшение определяемой из данной зависимости величины концентрации ионизированной примеси.

Обычно полагают, что $R_b \ll R_d$, поэтому в случае, если $(R_b \omega C_d)^2 > 1$, выражение (1) принимает вид

$$C_M \simeq \frac{C_d}{\omega^2 R_b^2 C_d^2}. \quad (3)$$

Как видно из анализа выражения (3), с увеличением частоты измерения емкость C_M стремится к 0 пропорционально ω^{-2} . В то же время для исследовавшихся в настоящей работе структур минимальная величина емкости составляла примерно 10 пФ и зависимость величины C_M от частоты отсутствовала (участок А на рис. 2). Это указывает на то, что в данном случае требуется использовать более подробную эквивалентную схему диода, которая позволит более точно описать наблюдавшиеся экспериментальные зависимости. По-видимому, для нашего случая очень большого последовательного сопротивления на участке А $C-U$ -характеристики следует учесть емкость базы (C_b), и тогда эквивалентная схема диода имеет вид, изображенный на рис. 5, *c*. Выражение для величины C_M примет вид

$$C_M = \frac{(R_b/R_d + 1)(C_d + (R_b/R_d)C_b) - R_b/R_d(C_d + C_b) + \omega^2 R_b^2 C_b C_d (C_b + C_d)}{(1 + R_b/R_d)^2 + \omega^2 R_b^2 (C_d + C_b)^2}. \quad (4)$$

Полагая $R_b \simeq R_d$ и учитывая, что $(R_b \omega C_d)^2 \gg 1$, мы получаем

$$C_M \simeq \frac{C_d C_b}{C_d + C_b}. \quad (5)$$

Поскольку $C_d \gg C_b$, выражение (5) приходит к виду $C_M \simeq C_b$, т.е. при значениях $R_b \simeq R_d$ величина C_M

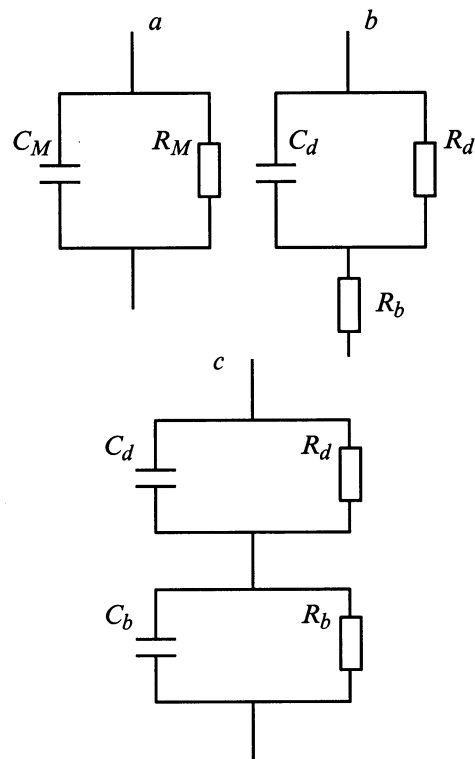


Рис. 5. Схемы диода при измерениях емкости: *a* — параллельная схема замещения, *b* — эквивалентная схема диода, *c* — эквивалентная схема диода при учете наличия тонкой высокоомной прослойки.

равна емкости двух последовательно включенных конденсаторов, причем ее абсолютная величина стремится к C_b , т.е. к нескольким пикофарадам. При этом будет отсутствовать зависимость емкости от частоты.

Анализ экспериментальных данных

Вернемся к исследовавшимся в настоящей работе структурам SiC⟨B⟩. Ряд экспериментальных данных говорит в пользу того, что на краю диффузионного распределения бора образуются в основном D -центры [11,12], поэтому в нашем случае компенсация n -базы скорее всего обусловлена образованием именно этих центров. При меньших исходных значениях $N_d - N_a$ в n -базе, образование данных центров может привести и к перекомпенсации n -базы вблизи металлургической границы $p-n$ -перехода (образование прослойки π -типа проводимости). Проводимость данной прослойки определяется ионизацией дырок с D -центра, которая при комнатной температуре мала. Таким образом, после диффузии бора вблизи $p-n$ -перехода возможно образование области π -типа проводимости, в которой при комнатной температуре практически отсутствуют свободные носители.

Рассмотрим теперь, как наличие подобной высокоомной прослойки сказывается на результатах емкостных измерений данных структур.

Участок А. При комнатной температуре и обратном напряжении сопротивление данной прослойки будет велико, $R_b \simeq R_d$. В соответствии с выражениями (4), (5)

$$C_M \simeq \frac{C_d C_b}{C_d + C_b} \simeq C_b.$$

Измеряемая емкость не зависит от частоты и мала по абсолютной величине. Построенная в данной области приложенных напряжений зависимость при $R_b \simeq R_d$ не может быть использована для определения величины $N_d - N_a$ в базе диода.

Участок В. В точке излома $C-U$ -характеристики приложенное прямое смещение оказывается достаточным, чтобы инжектированные носители промодулировали высокоомную прослойку. Вспышка желтой электролюминесценции говорит о том, что через диод начинает идти ток. В результате сопротивление базы начинает резко уменьшаться, теперь $R_b < R_d$, и для описания зависимости $C_M = f(U)$ можно использовать выражение (3). Однако следует учитывать, что каждому значению U будет соответствовать свое значение R_b и суммарная зависимость будет иметь вид

$$C_M = \frac{C_d}{1 + \omega^2 [R_b(U)]^2 C_d^2}. \quad (6)$$

Резкое уменьшение величины R_b приведет к тому, что C_M на участке В будет изменяться от C_b до C_d . Поэтому измеренная зависимость $C_M^{-2} = f(U)$ оказывается гораздо круче (а рассчитанное значение $N_d - N_a$ гораздо меньше), чем это имеет место в действительности. Когда $U \rightarrow U_C$, где U_C — напряжение отсечки, то $C_M \rightarrow C_d$, поэтому определенная из $C-U$ -характеристики величина U_C имеет обычное для подобных SiC- $p-n$ -структур значение ($U_C \simeq 2.5$ В при $T = 300$ К).

Температурная зависимость. С ростом температуры увеличивается вероятность термической ионизации носителей с D -центра. В результате в π -области увеличивается концентрация равновесных носителей и сопротивление прослойки падает. $C-U$ -характеристика приобретает свой недеформированный вид. Увеличение частоты опять приводит к нарушению условия (2) и $C-U$ -характеристика искажается.

Таким образом, на основе предположения о формировании после диффузии бора тонкой высокоомной прослойки в базе SiC-диода можно объяснить все наблюдавшиеся экспериментальные результаты.

Заключение

Исследованы SiC-диоды с высокоомной прослойкой в базе, сопротивление которой модулировалось при включении диода в прямом направлении. Показано, что, несмотря на отсутствие обычных признаков влияния

последовательного сопротивления (независимость емкости от частоты и малая величина емкостной отсечки), емкостные измерения в таких структурах могут быть некорректны.

Работа выполнена при поддержке фонда INCO-COPERNICUS, грант 96-0211.

Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, Н.А. Соболев. ФТП, **16**, 1874 (1982).
- [2] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках*. (Л., Наука, 1981).
- [3] О.В. Константинов, О.А. Мерзин. ФТП, **17**, 305 (1983).
- [4] Ю.А. Гольдберг, О.В. Иванова, Т.В. Львова, Б.В. Царенков. ФТП, **17**, 1068 (1983).
- [5] Е.В. Астрова, А.А. Лебедев, А.А. Лебедев. ФТП, **19**, 1382 (1985).
- [6] S. Ortolland, C. Raynald, J.P. Chante, M.L. Locatelli, A.N. Andreev, A.A. Lebedev, M.G. Rastegaeva, A.L. Syrkin, N.S. Savkina, V.E. Chelnokov. J. Appl. Phys., **80**, 546 (1996).
- [7] А.А. Лебедев, М.М. Аникин, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина, В.Е. Челноков. ФТП, **29**, 1635 (1995).
- [8] М.М. Аникин, А.А. Лебедев, А.Л. Сыркин, А.В. Суворов. ФТП, **19**, 69 (1985).
- [9] W. Suttrop, G. Pensl, P. Laning. Appl. Phys., A, **51**, 231 (1991).
- [10] М.М. Аникин, Н.И. Кузнецов, А.А. Лебедев, А.Л. Сыркин, А.М. Стрельчук. ФТП, **24**, 1384 (1990).
- [11] А.И. Вейнгер, Ю.А. Водаков, Ю. Кулев, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, В.И. Соколов. Письма ЖТФ, **6**, 1319 (1980).
- [12] V.S. Balandovich, E.N. Mokhov. *Transactions Second Intern. High Temperature Electronics Conference* (Charlotte NC, USA, 1994) v. 2. p. 181.

Редактор Т.А. Полянская

Capacitance measurements of diodes with strong dependence of the series resistance on the applied voltage

A.A. Lebedev, A.A. Lebedev, D.V. Davydov

Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A study has been done of epitaxial-diffusional 6H-SiC diodes having a high resistive layer in the base, of which the resistance strongly depends on the applied forward voltage. It has been shown, that despite the absence of usual evidence of the series resistance influence on capacitance measurements (the capacitance independence of frequency and small value of the capacitance cut of the voltage) these measurements may be incorrect.