

УДК 537.311.33

Исследование МДП-структур на основе МЛЭ $Cd_xHg_{1-x}Te$ с анодным окислом

В. В. Васильев, Ю. П. Машуков

Исследованы четыре образца молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) $Cd_xHg_{1-x}Te$, имеющих одинаковый состав $x = 0,22$, но различные концентрации электронов, причем часть из них имела на поверхности широкозонный варизонный слой. Диэлектриком в МДП-структурах служил анодный окисел. Для коррекции экспериментально измеренных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) в целях исключения влияния базового сопротивления предложена соответствующая процедура. Для одного из образцов определено генерационное сопротивление области пространственного заряда МДП-структуры, находящейся в режиме сильной инверсии.

PACS: 73.40.Qv; 81.15.Hi

Ключевые слова: исследование, образец, широкозонный слой, МДП-структура.

Введение

Слои $Cd_xHg_{1-x}Te$, осажденные методом МЛЭ, на подложках с высоким сопротивлением, например GaAs, являются одним из основных материалов для изготовления ИК-фотоприемников [1, 2].

В настоящей работе электрофизические характеристики таких слоев исследуются с помощью ВФХ. Диэлектриком в МДП-структурах служит анодный окисел на $Cd_xHg_{1-x}Te$, который является одним из возможных типов пассивирующего покрытия [3], поэтому сведения о его параметрах также представляют интерес.

Методика измерений

Исследованные образцы имели параметры, приведенные в таблице.

Номер образца	Концентрация электронов, $10^{14}, \text{см}^{-3}$	Наличие варизонного слоя
1	1,1	Нет
2	9,5	"
3	1,36	Есть
4	10,4	"

Толщина пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$ и варизонных слоев имели значения ~ 10 и $0,5$ мкм, соответственно.

Как показали многочисленные исследования, при расположении МДП-структур на эпитаксиаль-

ных пленках (а не на массивных кристаллах) $Cd_xHg_{1-x}Te$ существенное влияние на измерения оказывает продольное сопротивление пленки, так как при частотах порядка $100\text{--}500$ кГц оно соизмеримо с сопротивлением МДП-конденсатора. Вследствие этого измеритель импеданса ВМ-507, используемый для измерений, практически всегда показывает фазу комплексного сопротивления, существенно отличающуюся от -90° .

Для оценки величины базового сопротивления расчетным путем можно использовать выражение, в которое входит сумма трех величин:

сопротивление растекания МДП-структуры;
продольное сопротивление участка между МДП-структурой и базовым контактом;
сопротивление растекания базового контакта.
Соответственно этому имеем:

$$R_B = (\hbar\sigma)^{-1}((2\pi)^{-1}\ln(b/d_1) + L/b + (2\pi)^{-1}\ln(b/d_2)),$$

где σ — удельная объемная электропроводность эпитаксиальной пленки;

h — толщина пленки;

d_1 — характерный размер МДП-структуры;

d_2 — то же, для базового контакта;

b — ширина образца;

L — расстояние между МДП-структурой и базовым контактом.

В нашем случае полевой электрод МДП-структуры представляет собой квадрат $0,5 \times 0,5$ мм, а базовый контакт имеет размеры $\sim 2 \times 2$ мм.

В данной работе базовое сопротивление определялось экспериментально. Измеритель импеданса измеряет независимо модуль $|Z|$ и фазу φ комплексного сопротивления Z -объекта. Максимальная рабочая частота 500 кГц. При этом модуль характеризует емкостную составляющую адмиттанса

Васильев Владимир Васильевич, старший научный сотрудник.
Машуков Юрий Петрович, научный сотрудник.
Институт физики полупроводников СО РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, 13.
Тел.: (783) 333-10-82. E-mail: vas@thempo.isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 11 июня 2008 г.

(величина, обратная импедансу) МДП-структуры, а фаза — ее высокочастотную проводимость.

При измерении $|Z|$ шкала прибора и, соответственно, аналоговый сигнал являются обратными, т. е. показания прибора пропорциональны $|Z|^{-1}$. Так как емкостное сопротивление конденсатора равно $1/\omega C$, можно шкалу $|Z|$ проградуировать в единицах емкости, введя величину $C = 1/\omega|Z|$. Эта величина будет совпадать с настоящей емкостью, если МДП-структура будет иметь чисто емкостное сопротивление.

Получим выражения, позволяющие выделить сопротивление МДП-структуры из экспериментально измеренного комплексного сопротивления ее образца. Эквивалентная схема при наличии продольного сопротивления показана на рис. 1, где Z_E — полное комплексное сопротивление образца, экспериментально измеренное, а R_B — последовательное сопротивление, или сопротивление базы.

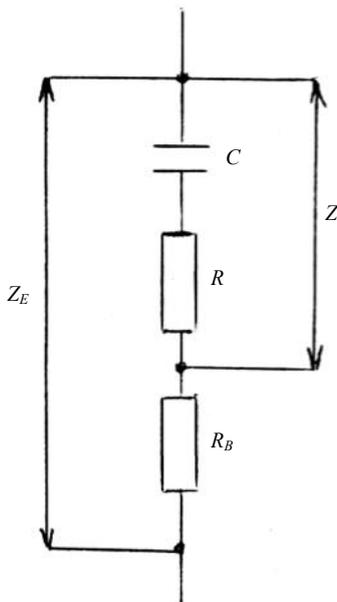


Рис. 1. Эквивалентная схема МДП-структуры при наличии продольного сопротивления

Имеем:

$Z_E = |Z_E| (\cos\varphi_E + j\sin\varphi_E)$, где φ_E — фаза Z_E , j — мнимая единица.

Далее: $Z = Z_E - R_B = (|Z_E|\cos\varphi_E - R_B) + j|Z_E|\sin\varphi_E$.

$$C = 1/\omega \text{Im}Z = 1/\omega |Z_E| \sin\varphi_E = C_E/\sin\varphi_E, \quad (1)$$

где $C_E = 1/\omega |Z_E|$;

$$\text{tg}\varphi = \text{Im}Z/\text{Re}Z = \text{tg}\varphi_E / (1 - R_B/\cos\varphi_E |Z_E|).$$

Выражение (1) позволяет быстро оценить значение емкости МДП-структуры по измеренному значению емкости всего образца.

Зная значения C и φ , можно, при необходимости, легко получить более привычные значения — емкость и приведенную проводимость, G/ω , для параллельной эквивалентной схемы МДП-структуры.

Экспериментальные результаты

Измерения электрической прочности образцов показали, что все они способны были выдержать напряжения, необходимые для измерения существенной части ВФХ. Значения пробивных напряжений для четырех образцов изменялись в пределах 2—5 В, причем для каждого из образцов величина этого напряжения, измеренная на различных МДП-структурах, была весьма стабильной (разброс 0,5 В); весьма однородными по площади были также и другие параметры — толщина, емкость в обогащении.

Для всех образцов МДП-структуры имели примерно одинаковую емкость диэлектрика (500—600 пФ). Величина минимальной емкости у образца 2 была примерно та же, что и у образца 1 (немного больше), а у варизонных образцов 3 и 4 — существенно меньше (130 и 90 пФ, соответственно). На всех образцах на частоте 500 кГц наблюдались частично высокочастотные ВФХ. На образцах 1, 2, 4 положение напряжения плоских зон свидетельствовало о наличии большого положительного фиксированного встроенного заряда на уровне $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, на варизонном образце 3 такой заряд отсутствовал. Последний факт представляется весьма интересным, так как известно [3, 4], что анодное окисление $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ всегда приводит к появлению на границе раздела с полупроводником положительного заряда приблизительно указанной выше величины. Эллипсометрические измерения на одном из образцов (образец 1) дали значения толщины и показателя преломления анодного окисла: 59 нм и 2,17, соответственно. В сочетании с емкостью обогащения получили для диэлектрической постоянной $\epsilon = 14$.

Вольт-фарадная характеристика для образца 1, который был способен выдержать напряжение ± 5 В без значительных токов утечки, показана на рис. 2: площадь МДП-структуры $A = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$; температура 80 К; частота тестирующего сигнала 300 кГц; частота пилообразной развертки по напряжению $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Для этого же образца были тщательно измерены характеристики в районе минимума (рис. 3).

Обсудим экспериментальные результаты относительно глубины минимума на ВФХ. Для оценок используем известное выражение для минимальной высокочастотной емкости (HF) области пространственного заряда (ОПЗ) [5]:

$$(C_{SC}^{HF})_{\min} = A(\epsilon\epsilon_0 q^2 n / 4kT \ln\lambda^{-1})^{0,5}. \quad (2)$$

Учтем, что для состава 0,22 при азотной температуре собственная концентрация $n_i = 1,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Учтем также, что для низкочастотной (равновесной) ВФХ емкость ОПЗ в минимуме ВФХ примерно на 10 % выше минимальной высокочастотной.

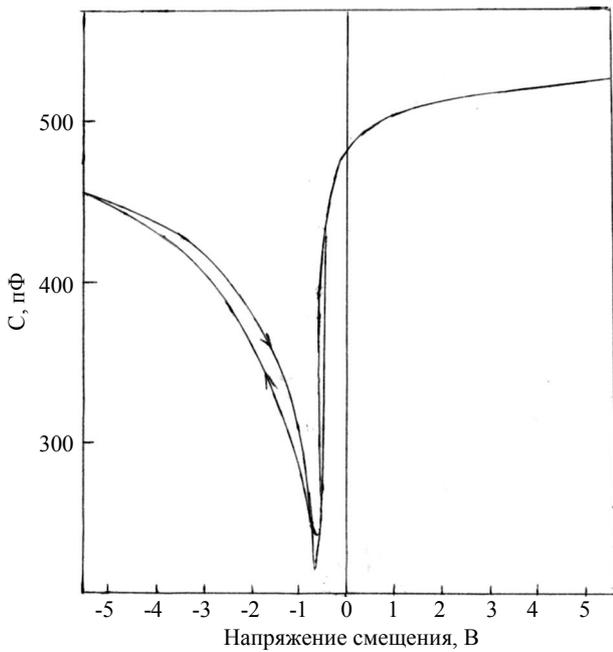


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика образца 1

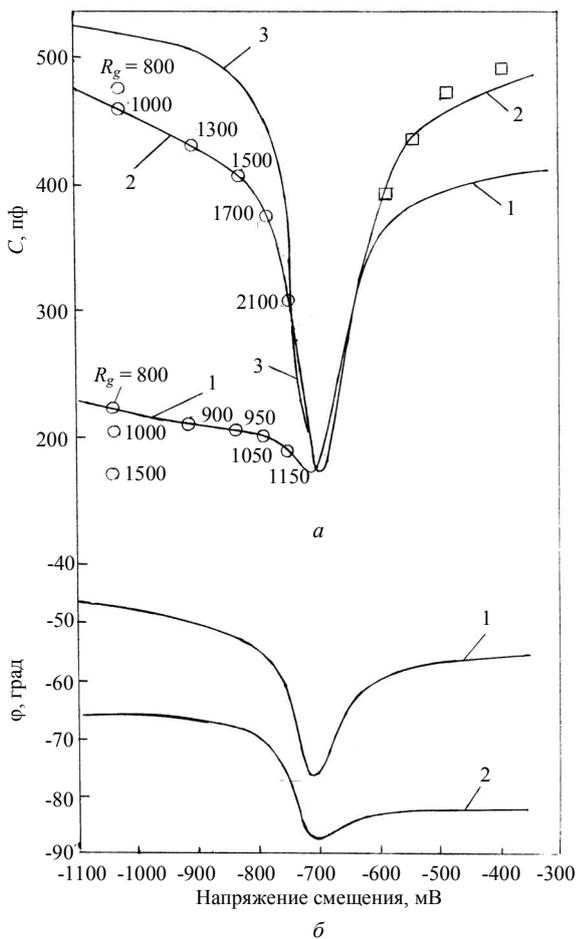


Рис. 3. Вольт-фарадная (а) и фазовая (б) характеристики МДП-структуры на образце 1 в районе минимума ВФХ для двух частот тестирующего сигнала: 1 — 500 кГц; 2 — 100 кГц; 3 — расчетная низкочастотная ВФХ. Частота развертки $1 \cdot 10^{-3}$ Гц; \square — значения емкости на частоте 500 кГц после коррекции с помощью выражения (1); \circ — расчетные значения емкости при указанных значениях генерационного сопротивления R_g

Сравним между собой образцы 1 и 2. Считая, что концентрация доноров N_d равна холловской концентрации электронов, получаем, что $(C_{SC}^{HF})_{\min}$ должна быть у образца 2 в 2,2 раза выше. На самом деле это отношение равно всего 1,15. Наблюдаемые экспериментально величины емкости в минимуме ВФХ существенно больше, чем предсказываемые выражением (2). Обычно такое превышение емкости связывают с наличием быстрых поверхностных состояний, однако в нашем случае весьма вероятно еще одна причина увеличения емкости структуры — наличие глубоких центров. При обеднении и инверсии их перезарядка вызывает увеличение концентрации неподвижных зарядов по сравнению с величиной N_d , что и приводит к сокращению толщины ОПЗ, т. е. к увеличению емкости.

Сравнение между собой варизонных образцов 3 и 4 показывает вообще несоответствие глубины минимума ВФХ и экспериментальной емкости: у образца 4 с большей концентрацией электронов наблюдается более глубокий минимум ВФХ.

Отметим, что ВФХ для образца 1, показанная на рис. 2, демонстрирует не совсем обычный гистерезис — при обратном ходе развертки изменяется не только положение минимума, но и его глубина.

Сравнение экспериментальных значений ВФХ с расчетными

Одна из МДП-структур на образце 1 была исследована особенно подробно и на ее основании проведено сравнение экспериментальных кривых с расчетными.

На рис. 3, а показана часть ВФХ вблизи минимума для двух частот: 500 и 100 кГц, а на рис. 3, б — дана фаза в том же диапазоне напряжений. Под емкостью, как было обсуждено выше, подразумевается величина $1/|\omega Z|$.

Рассмотрим зависимость $\varphi(V)$. Видно, что во всей исследованной области напряжений φ существенно отличается от -90° , что легко объяснить наличием базового сопротивления. Так как меньшей емкости соответствует большая величина емкостной составляющей импеданса, при минимальной емкости наблюдается также минимум φ (максимум $|\varphi|$). При частоте 100 кГц все значения модуля фазы больше вследствие большей величины $1/\omega C$.

Определим R_B из измерений в области сильного обогащения, считая, что при этом в самой МДП-структуре все механизмы, дающие диэлектрические потери, отсутствуют, т. е. R (см. рис. 1) равно нулю.

Имеем для напряжения +5 В и частоты 500 кГц: $C = C_D = 540$ пФ и $|\varphi| = 53^\circ$, тогда получим $R_B = \text{ctg}|\varphi|/\omega C_D = 444$ Ом.

На частоте 100 кГц имеем $|\varphi| = 82^\circ$, что дает близкое значение $R_B = 414$ Ом. Для дальнейших расчетов примем величину 444 Ом, так как при 500 кГц влияние R_B на экспериментальные значения импеданса сильнее и полученные значения R_B достовернее.

При сильной инверсии (левые части ВФХ) значения φ_E больше соответствующих значений φ_E при такой же емкости в правой части ВФХ. Это свидетельствует о появлении потерь в самой МДП-структуре, которые обусловлены обменом зарядами между инверсионным слоем и объемом. Наблюдается промежуточный случай — при 500 кГц ВФХ ближе к высокочастотным, а при 100 кГц — к низкочастотным.

Остановимся на экспериментальной зависимости $C(V)$. Глубина минимума составляет 172 пФ как при 500, так и при 100 кГц. Эта величина оказалась меньше, чем измеренная при развертке по напряжению с амплитудой 5 В. Интересно также, что минимум при 100 кГц сдвинут вправо на величину 13 мВ по отношению к минимуму на частоте 500 кГц. Возможно, это связано с накоплением заряда в диэлектрике в промежутке времени между двумя измерениями.

Попытаемся добиться совпадения расчетной и экспериментальной кривых, используя известное выражение для емкости ОПЗ:

$$C_{SC} = \epsilon\epsilon_0[\lambda(1 - \exp(-v_s)) - \lambda^{-1}(1 - \exp(v_s))]/2L F(\lambda, v_s).$$

Если подобрать величину $\lambda = n_i/n$ исходя из значения емкости в минимуме ВФХ, получим $\lambda^{-1} = 260$, однако при этом правая ветвь ВФХ будет идти менее круто, чем экспериментальная. Чтобы получить нужную крутизну, следует положить $\lambda^{-1} = 100$. В этом случае минимальная емкость уменьшится, поэтому, чтобы согласовать с экспериментом глубину минимума и крутизну правой ветви, следует предположить наличие некоторого количества быстрых поверхностных состояний.

Правая ветвь ВФХ на частоте 500 кГц идет ниже, чем для частоты 100 кГц. Однако это всего лишь следствие наличия базового сопротивления. Проведя коррекцию, используя выражение (1) и значения фазы, показанные на рис. 3, б, получим близкое совпадение правых ветвей ВФХ для двух частот.

Рассмотрим левые ветви ВФХ. Используем для расчетов обычную эквивалентную схему, показанную на рис. 4. Значение λ^{-1} примем равным 260, а поверхностные состояния учитывать не будем. Для каждого выбранного напряжения будем подбирать величину R_g таким образом, чтобы расчетная точка попадала бы на экспериментальную кривую. Указанные точки показаны на рис. 3, а. Видно, что значения R_g изменяются как вдоль каждой кривой, так и различаются для двух кривых

между собой. Однако диапазон изменения R_g не так велик. Так как R_g — сопротивление индуцированного p - n -перехода сильно инвертированной МДП-структуры, можно сопоставить полученные нами значения с известными из литературы значениями величины R_0A для настоящих p - n -переходов.

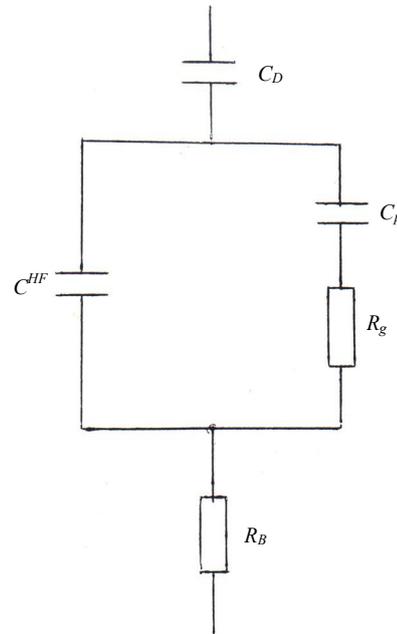


Рис. 4. Эквивалентная схема МДП-структуры при инверсии:

C_D — емкость диэлектрика; C^{HF} — высокочастотная емкость ОПЗ при сильной инверсии; R_g — генерационное сопротивление; C_p — емкость дырок в инверсионном слое; R_B — продольное или базовое сопротивление

Считая $R_g = 1000$ Ом, $A = 2,5 \cdot 10^{-3}$ см², получаем $R_g \cdot A = 2,5$ Ом·см², что хорошо согласуется с величинами, известными из литературы для состава 0,22.

Выводы

1. Не обнаружено четкого соответствия между концентрацией доноров, полученной из холловских измерений, и глубиной минимума ВФХ. Это свидетельствует о наличии в запрещенной зоне $Cd_xHg_{1-x}Te$ других, кроме мелкого донорного, уровней примеси.

2. На основании анализа инверсионной части ВФХ с учетом влияния базового сопротивления образца определено генерационное сопротивление индуцированного p - n -перехода в сильно инвертированной МДП-структуре; его величина характеризует высокое качество материала $Cd_xHg_{1-x}Te$.

3. Указано на принципиальную возможность получения анодного окисла на варизонном $Cd_xHg_{1-x}Te$ без большого положительного встроенного заряда.

Благодарим Ю. Г. Сидорова за предоставление образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$ с анодным окислом.

Л и т е р а т у р а

- 1 Овсяк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
- 2 Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. Focal plane arrays based on CdHgTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates// Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 956.
- 3 Leonard W. F., Vichaek M. Surface-state of nonparabolic band semiconductors using MIS structures// J. Appl. Phys. 1979. No. 50(3). March. P. 1450.
- 4 Nguen Thi Bao Ngoc, Nguyen Van Nha. The interface characteristics of passivity anodic oxide films on Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te by C-V measurements// Thin Solid Films. 1998. No. 334. P. 40—43.
- 5 Овсяк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1984.

Investigation of the MIS structures of the MBE Cd_xHg_{1-x}Te — anodic oxide

V. V. Vasilyev, Yu. P. Mashukov

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

13, Ac. Lavrentyeva av., Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: vas@thempo.isp.nsc.ru

It is investigated 4 MBE Cd_xHg_{1-x}Te patterns, having the same composition $x = 0.22$, but different concentrations of electrons, by that, a part of the patterns had a wide gap graded surface layer. In capacity of a dielectric in the MIS structures the anodic oxide is served. For correction of the experimental measured capacitance-voltage characteristics, with the purpose of the exclusion of the base resistance influence, the suitable procedure is proposed. For one of the patterns the generation resistance of the space charge region of the MIS structure, being in the strong inversion state, is determined.

PACS: 73.40.Qv; 81.15.Hi

Keywords: investigation, wide gap layer, pattern, MIS structure.

Bibliography — 5 references.

Received 11 June 2008