

**ОСОБЕННОСТИ АДМИТТАНСА МДП-СТРУКТУР
НА ОСНОВЕ СЛОЕВ КРТ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ****А. В. Ярцев***Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: jartsev@ngs.ru*

Исследован адмиттанс структур металл–диэлектрик–полупроводник на основе слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из полужолирующего GaAs. Обнаружен эффект аномальной генерации на поверхности $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в сильном электрическом поле ($\approx 10^5$ В/см). Показано, что плотность поверхностных состояний границы раздела КРТ– SiO_2 слабо зависит от наличия варизонного слоя и типа проводимости полупроводника.

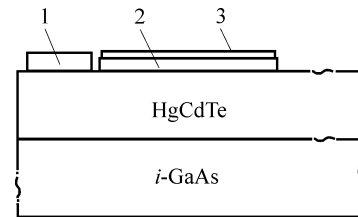
Введение. В настоящее время основным материалом для изготовления матричных приемников излучения дальнего ИК-диапазона являются слои соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ), получаемые методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1]. Более перспективной является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) слоев КРТ, которая позволяет изготавливать однородные слои большого диаметра, а также выращивать вблизи границ варизонные слои, устраняющие влияние поверхностных эффектов на характеристики фотоприемников [2, 3]. Данные о поверхностных свойствах слоев КРТ МЛЭ практически отсутствуют.

Качество фоточувствительных p – n -переходов определяется их обратными токами, на величину которых решающим образом влияет состояние поверхности полупроводника, окружающей p – n -переходы. Состояние поверхности должно тщательно контролироваться. Один из эффективных методов контроля приповерхностных свойств полупроводников основан на изучении вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и адмиттанса МДП-структур, однако к настоящему времени основные исследования выполнены на слоях КРТ, полученных методом ЖФЭ [4–6].

Основная задача данной работы – характеристика состояния поверхности КРТ, полученной методом МЛЭ.

Образцы и методика эксперимента. Эпитаксиальные слои КРТ выращивались на подложке из полужолирующего GaAs [7]. Диэлектрики SiO_2 и Si_3N_4 осаждались плазмохимическим методом при температуре 90 °С. Верхний металлический электрод состоял из последовательно напыленных слоев

Рис. 1. Схема профиля МДП-структуры: 1 – базовый металлический контакт (Al), 2 – диэлектрический слой толщиной около 120 нм (SiO₂ – 80 нм и Si₃N₄ – 40 нм), 3 – полевой металлический электрод (Al, Ni, Al) толщиной 200 нм



Ni, Al и Ni. Полученные МДП-структуры имеют площадь $A = 10^{-3} \text{ см}^2$ и схематически показаны на рис. 1.

В таблице приведены основные характеристики типичных исследованных образцов. На поверхности КРТ выращивался варизонный слой толщиной 0,5 мкм с линейно меняющимся по глубине молярным составом от $x = 0,223$ в объеме до $x \approx 0,5$ на поверхности. В образцах 2 и 4 перед нанесением диэлектриков варизонный слой удалялся.

Адмиттанс был измерен при температуре $T = 78 \text{ К}$ на частоте модуляции 100 кГц и амплитуде переменной составляющей 2 мВ. К управляющему электроду прикладывался потенциал V_g в диапазоне от -5 до $+5 \text{ В}$ с частотой развертки 10^{-3} Гц . Полный адмиттанс Z^{-1} измерялся по параллельной схеме подключения емкости и активного сопротивления (рис. 2, а): $Z^{-1} = G + i\omega C$.

Результаты измерений и их обсуждение. Результаты измерений адмиттанса представлены на рис. 3 и 4. Показано, что реактивная составляющая адмиттанса C образцов имеет низкочастотный вид за исключением структур на основе n -КРТ с варизонным слоем. Активная составляющая адмиттанса равна нулю в инверсии, увеличивается в обеднении, достигает максимума при переходе в область инверсии и затем плавно уменьшается при дальнейшем увеличении потенциала на полевом электроде.

В приближении равномерного распределения поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне их плотность N_t может быть получена из соотношения [8]

$$N_t = \frac{C_d (V_{gi} - V_{gi0}) E_g}{e V_i e}, \quad (1)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны; V_i – потенциал на поверхностном электроде в начале инверсии; V_{gi} – экспериментальное значение потенциала на по-

№ образца	Тип проводимости	Варизонный слой	Концентрация основных носителей заряда, см ⁻³	Подвижность основных носителей заряда, см ² /В·с	Время жизни, с	d , мкм
1	n	+	$3,5 \cdot 10^{14}$	70000	$5 \cdot 10^{-6}$	8,0
2	n	–	$2,2 \cdot 10^{14}$	70000	$2 \cdot 10^{-6}$	8,9
3	p	+	$4,1 \cdot 10^{15}$	490	$< 8 \cdot 10^{-9}$	8,7
4	p	–	$7,5 \cdot 10^{15}$	585	$< 8 \cdot 10^{-9}$	8,2

П р и м е ч а н и е. d – толщина эпитаксиального слоя КРТ.

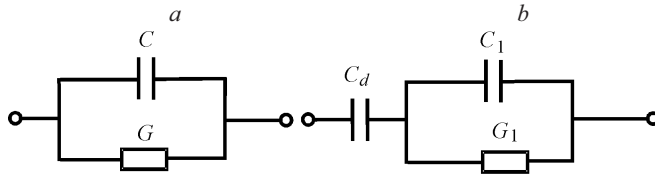


Рис. 2. Эквивалентная схема МДП-структуры: при измерении импеданса (а); схема замещения МДП-структуры в режиме инверсии (b) (C_d – емкость диэлектрика, C_1 – емкость слоя обеднения, G_1 – активная проводимость, ответственная за перезарядку инверсионного слоя)

левом электроде, необходимого для перехода полупроводника из точки плоских зон в начало инверсии; V_{gi0} – теоретическое значение этого же потенциала, получаемое без учета влияния поверхностных состояний.

Разность $V_{gi} - V_{gi0}$ представляет собой уширение экспериментальной ВФХ по сравнению с теоретической. Для нахождения величины V_{gi} на экспериментальной ВФХ необходимо найти точки плоских зон и начала инверсии. Начало инверсии с хорошей точностью соответствует минимуму ВФХ, а положение плоских зон определяется как точка пересечения двух прямых, аппроксимирующих области экспериментальной ВФХ, в обогащении и обеднении полупроводника. Заметим, что погрешность данного метода не превышает 20 %.

В результате расчета из (1) получим следующие значения плотности поверхностных состояний, которые хорошо согласуются с данными исследований на образцах КРТ, полученных методом ЖФЭ [9]: $N_t^{(1)} = 3,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; $N_t^{(2)} = 4,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; $N_t^{(3)} = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и $N_t^{(4)} = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ для образцов 1–4 соответственно (см. таблицу). Видно, что плотность состояний границы раздела КРТ – SiO_2 слабо зависит от наличия варизонного слоя и типа проводимости полупроводника.

Электрическая схема замещения МДП-структуры в режиме инверсии приведена на рис. 2, b [10]. Проводимость G_1 имеет три основных компонен-

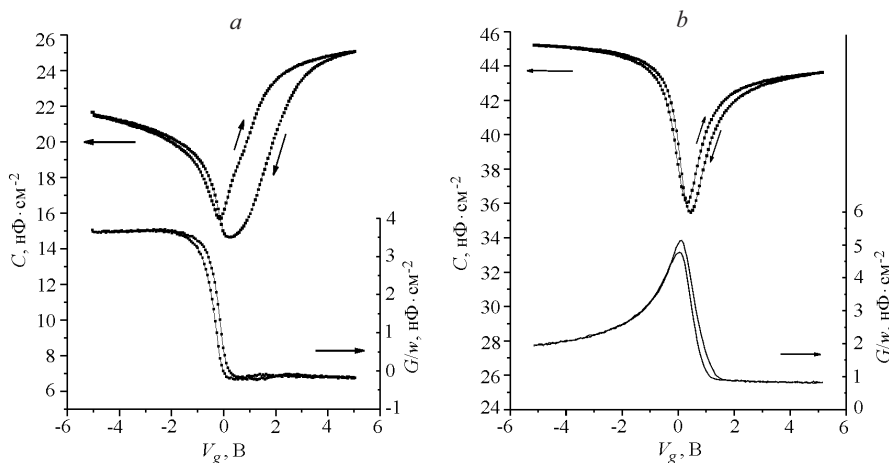


Рис. 3. Измеренные активная и реактивная составляющие ВФХ МДП-структур: n-КРТ с варизонным слоем (а) и без варизонного слоя (b)

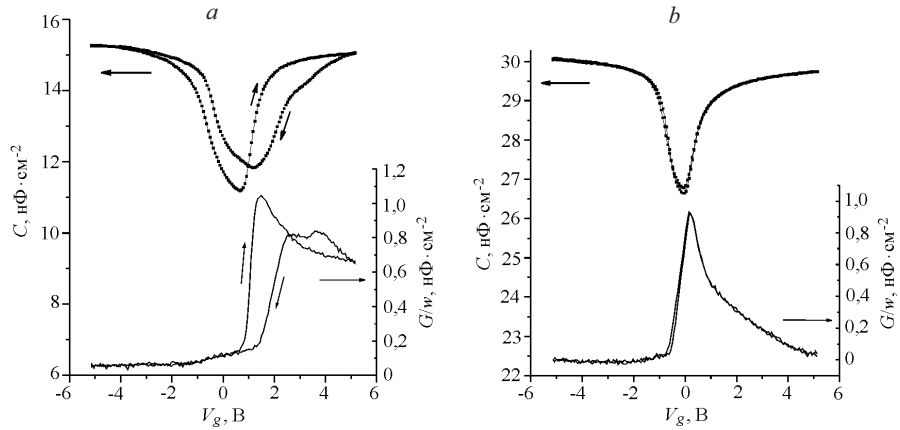


Рис. 4. Измеренные активная и реактивная составляющие ВФХ МДП-структур: *p*-КРТ с варизонным слоем (а) и без варизонного слоя (б)

ты [10]: диффузию из объема G_{dif} , генерацию в слое обеднения G_{gr} и генерацию через поверхностные состояния G_t . При увеличении напряженности электрического поля F_s на поверхности КРТ G_{dif} и G_{gr} остаются постоянными, а G_t уменьшается по закону $\sim n_s^{-1}$ [10], где n_s – концентрация носителей заряда в инверсионном слое. Однако в образцах 2 и 4 (без варизонного слоя) наблюдается увеличение проводимости G_1 за счет повышения F_s (рис. 5). Согласно температурным измерениям энергия активации проводимости G_1 не превышает 10 мэВ.

Аномальная генерация поверхностного заряда с низкой энергией активации ранее наблюдалась в МДП-структурах на основе других материалов (Ge, InSb) в [11–13], однако механизмы аномальной генерации, предложенные в этих работах, не могут быть применены к нашему случаю, поскольку адмиттанс структур на основе КРТ измерялся при квазиравновесном состоянии полупроводника.

Отметим, что найденный нами темп перезарядки инверсионного слоя в МДП-структурах на основе КРТ зависит от поверхностной напряженности

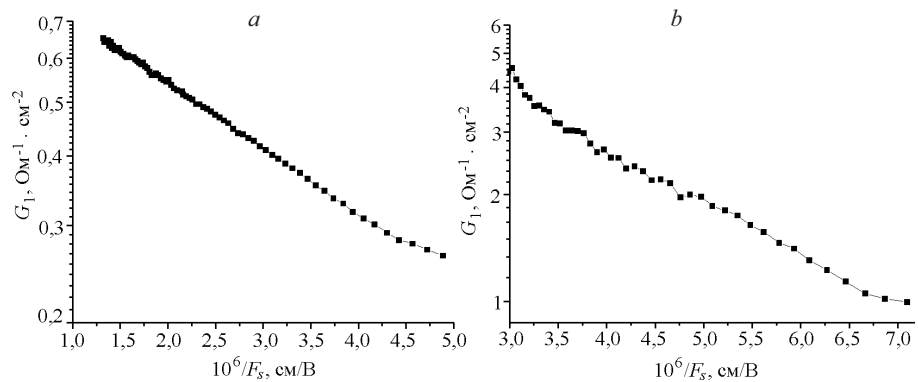


Рис. 5. Зависимость проводимости G_1 от напряженности электрического поля в диэлектрике: *n*-тип (а) и *p*-тип (б) без варизонного слоя

электрического поля по закону $G_1 \sim \exp(1/F_s)$, что формально соответствует туннелированию носителей заряда через треугольный барьер. В связи с этим предположим, что за аномальную генерацию ответственны «вкрапления» малой площади с высокой концентрацией встроенного заряда, расположенные на поверхности КРТ и фиксирующие поверхностный потенциал полупроводника в области сильного обогащения. При инверсии по периметру вкраплений индуцируется сильное электрическое поле, которое может стать причиной туннельного обмена носителями заряда между валентной зоной и зоной проводимости. Появление аналогичного эффекта можно ожидать в краевой области, расположенной по периметру МДП-структуры.

Для варизонных образцов явление аномальной генерации выражено значительно слабее, что объясняется более широкой запрещенной зоной КРТ вблизи границы раздела с диэлектриком.

Заключение. В работе исследован адмиттанс МДП-структур на основе слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, полученных методом МЛЭ на подложках из полуизолирующего GaAs при значении мольного состава $x = 0,223$, соответствующий границе фоточувствительности 10 мкм. Определено, что плотность состояний на границе раздела КРТ– SiO_2 лежит в диапазоне значений $(1,7-4,0) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и слабо зависит от типа проводимости полупроводника и наличия варизонного слоя.

Впервые обнаружен эффект аномальной генерации инверсионного заряда в сильном электрическом поле F_s с низкой энергией активации в квазиравновесных условиях на поверхности КРТ. Установлено, что в диапазоне значений $F_s = (2-9) \cdot 10^5 \text{ В/см}$ темп генерации следует закону $\exp(-1/F_s)$. Высказано предположение, что аномальная генерация связана с туннелированием носителей заряда на участках малой площади при высокой концентрации встроенного заряда. В дальнейшем эффект аномальной генерации необходимо учитывать при подавлении поверхностных токов фотодиодов на основе МЛЭ КРТ.

Автор выражает благодарность В. Н. Овсюку за обсуждение полученных результатов, В. В. Васильеву и Т. И. Захарьяш за изготовление МДП-структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003.
2. **Есаев Д. Г., Кравченко А. Ф., Осадчий В. М., Сусяков А. О.** Исследование влияния варизонности эпитаксиальных слоев на эффективность работы фотодиодов на основе твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // ФТП. 2000. **34**, вып. 7. С. 877.
3. **Васильев В. В., Дворецкий С. А., Есаев Д. Г. и др.** Фотоприемники на основе слоев CdHgTe , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 4.
4. **Nemirovsky Y.** Tunneling and dark currents in HgCdTe photodiodes // Journ. Vac. Sci. Technol. A. 1989. **7**, N 2. P. 528.
5. **Anderson W. W., Hoffman H. J.** Surface-tunneling-induced 1/f noise in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiodes // Journ. Vac. Sci. Technol. A. 1983. **1**, N 3. P. 1730.
6. **Bhar R. K.** Analysis of the ideality factor in surface leaky HgCdTe photodiodes for the long wavelength infrared regions // Semicond. Sci. Technol. 1997. **12**. P. 448.

7. **Овсюк В. Н., Сусяков А. О., Захарьяш Т. И. и др.** Фотосопротивления на основе пленок CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 1996. № 4. С. 45.
8. **Овсюк В. Н.** Электронные процессы в полупроводниках. Новосибирск: Наука, 1984.
9. **Wilson J. A.** HgCdTe–SiO₂ interface structure // Journ. Vac. Sci. Technol. A. 1983. 1. P. 1719.
10. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1.
11. **Вьюков Л. А., Гергель В. А., Соляков А. М.** Локальная генерация в ОПЗ МДП-структур как причина уменьшения времени релаксации с напряжением // Микроэлектроника. 1980. 9. С. 107.
12. **Гергель В. А., Стариков Т. И., Тишин Ю. И.** Релаксационные процессы в МДП-структурах при больших напряжениях // Микроэлектроника. 1979. 9. С. 351.
13. **Настаушев Ю. В., Неизвестный И. Г., Овсюк В. Н.** Аномальная термополевая генерация поверхностного заряда в германиевых МДП-структурах // Поверхность. 1993. № 11. С. 116.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.
