

УДК 621.315.592

Фотоэлектрические характеристики неоднородных МДП-структур на основе Si, HgCdTe

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, Н. А. Кульчицкий
Сибирский физико-технический институт, г. Томск, Россия

Исследовано влияние неоднородностей распределения темнового сопротивления полупроводника в приповерхностном слое и поверхностного потенциала на интегральные и локальные свойства МДП-фотодетекторов.

Исследованы интегральные и локальные фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе Si и HgCdTe, обладающих значительным сигналом фотоЭДС в обогащении (группа А), а также структур, имеющих пики на локальных зависимостях фотоЭДС от напряжения (группа Б). Технология изготовления p -HgCdTe—Al₂O₃ и n -Si—SiO₂-структур и методики исследований описаны в работах [1].

Экспериментальные результаты

Фотоэлектрические свойства МДП-структур группы А

Исследования интегральных фотоэлектрических свойств структур группы А позволили выявить следующие особенности [2]:

- 1 — зависимость фотоЭДС от напряжения отличается от классической. В режиме обеднения наблюдается минимум фотоЭДС, сигналы которых в режиме обогащения и в режиме сильной инверсии находятся в противофазе;
- 2 — форма осциллограмм сигнала фотоЭДС в режимах обеднения — слабой инверсии резко отличается от синусоидальной;
- 3 — соотношение сигналов фотоЭДС в обогащении и в сильной инверсии зависит от частоты модуляции и интенсивности светового потока;
- 4 — интегральные температурные зависимости фотоЭДС в обогащении и инверсии различны, при инверсионных напряжениях фотоЭДС проходит через минимум и изменяет фазу при повышении температуры.

В результате исследований локальных свойств установлено, что особенности фотоэлектрических характеристик структур со значительным сигналом в обогащении связаны с тем, что в образовании фотоЭДС принимают участие две области, в которых сигналы локальной фотоЭДС имеют противоположные фазы, неодинаковые зависимости фотоЭДС от напряжения, частоты, температуры, интенсивности светового потока (рис. 1). В заэлектродных областях фоточувствительности локальная фотоЭДС минимальна при инверсионных напряжениях на полевом электроде, а при обогащающих — максимальна и постоянна. В обогащении интегральная фотоЭДС определяется фоточувствительностью заэлектродных областей (см. рис. 1, а), а в обеднении инверсии интегральный сигнал представляет собой сумму сигналов двух областей (подэлектродной и заэлектродной) при доминировании сигнала подэлектродной области (см. рис. 1, б). Методом селективного травления установлено, что в заэлектродных областях фоточувствительности повышена плотность фигур травления. Фоточувствительность в заэлектродных областях связана с неоднородным распределением темнового сопротивления полупроводника из-за подлежающего действия электрически активных дефектов.

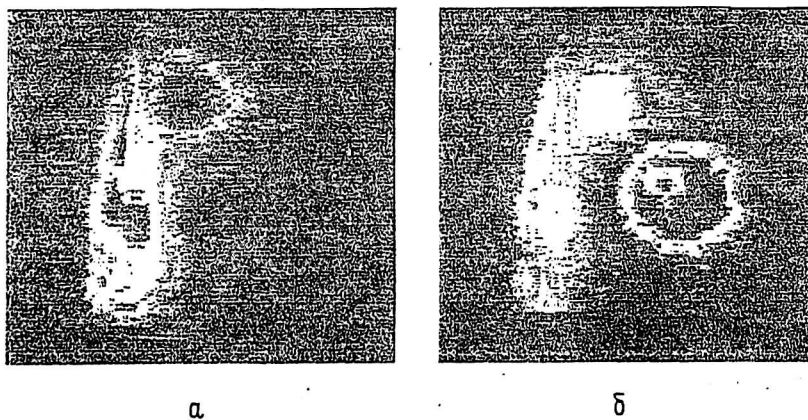


Рис. 1. Яркостные картины распределения фотоЭДС по площади Si — SiO₂-структур из группы А при напряжении 5 В (а) и при напряжении 3 В (б)

Фотоэлектрические свойства МДП-структур группы Б

Необычным в фотоэлектрических свойствах структур группы Б является резкий пик на локальных полевых зависимостях фотоЭДС в некоторых точках под полевым электродом. Для части структур спад фотоЭДС наблюдался во всех точках под электродом (случай 1), а в инверсии в образовании фотоЭДС принимает участие обширная заэлектродная область; для других структур спад локальной фотоЭДС в инверсии наблюдался в области меньшей, чем размеры полевого электрода (случай 2). Величина пика на зависимости локальной фотоЭДС уменьшается с увеличением частоты модуляции излучения.

На рис. 2 приведены планарные распределения фотоЭДС Si—SiO₂-структуры при обедняющих в инверсионных напряжениях. Из рис. 2 видно, что в образовании фотоЭДС принимают участие подэлектродная и заэлектродные области (группа Б, случай 1). Локальная зависимость фотоЭДС от напряже-

ния в подэлектродной области имеет резкий максимум при $V = -0,4$ В (см. рис. 2, б), в режиме инверсии подэлектродная фотоЭДС спадает (см. рис. 2, а).

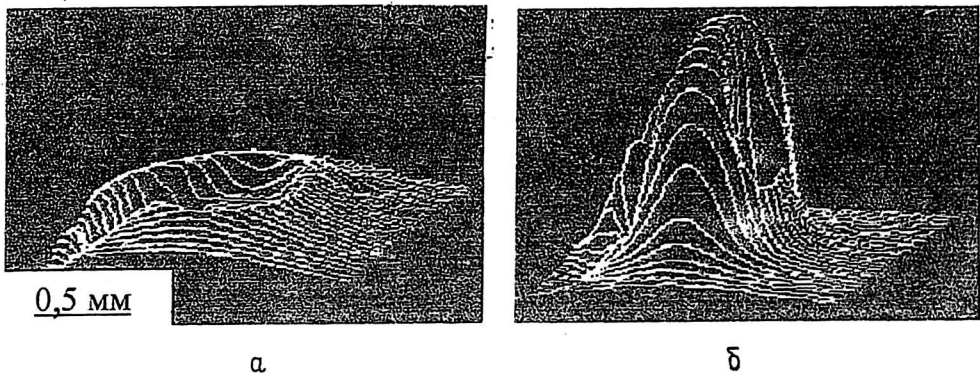


Рис. 2. Распределение фотоЭДС по площади $Si - SiO_2$ -структуры (группа Б, случай 1): $V = -6$ В (а); $V = -0,4$ В (б)

На рис. 3 изображены типичное распределение сигнала фотоЭДС по поверхности структуры $p-HgCdTe-Al_2O_3$, измеренное в режиме инверсии при низкой частоте модуляции светового потока, а также геометрия структуры. Полевая зависимость сигнала фотоЭДС вблизи границы между прозрачным и непрозрачным электродами носит экстремальный характер: при $V > -1$ В фотоЭДС уменьшается, а у противоположного края полупрозрачного электрода — монотонно возрастает до насыщения. На рис. 4 приведены полевые зависимости локальной фотоЭДС в различных точках $p-HgCdTe-Al_2O_3$ -структуры (расположение точек А, В, С, D, Е показано на рис. 3). В областях А и В наблюдается максимум, для С — максимум выражен слабо, для D и Е — не наблюдается.

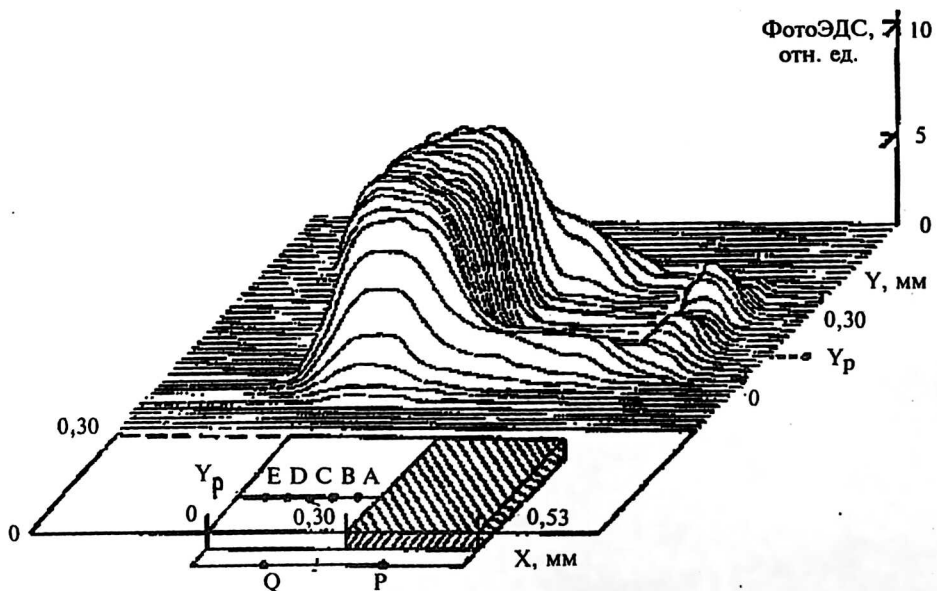


Рис. 3. Распределение фотоЭДС по площади полевого электрода (группа Б, случай 2) в режиме инверсии и топология $HgCdTe-Al_2O_3$ -структуры

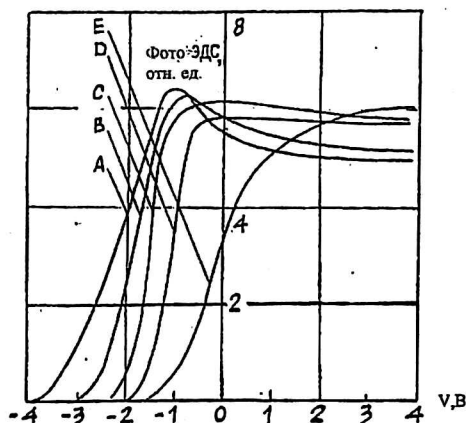


Рис. 4. Локальные зависимости фотоЭДС от напряжения смещения в различных точках HgCdTe—Al₂O₃-структуры (группа Б, случай 2)

В результате исследований локальных свойств установлено, что во всех случаях спад локальной фотоЭДС в инверсии в одной области сопровождается ростом фотоЭДС, в другой области — ростом фоточувствительности. Сигналы фотоЭДС в областях с классическим и аномальным видом полевой зависимости фотоЭДС синфазны. Локальные зависимости фотоЭДС в разных точках сдвинуты по оси напряжений, что свидетельствует о неоднородности фиксированного заряда по площади структуры. Область с классическим видом зависимости локальной фотоЭДС может находиться под электродом (случай 2), а также за пределами электрода (случай 1).

Обсуждение результатов

Объяснить наблюдаемые $U_{фз}(V)$ -зависимости можно на основании представлений о перераспределении неравновесных носителей заряда вдоль поверхности полупроводника в локально-освещенной МДП-структуре. Для учета дрейфа неравновесных носителей заряда вдоль поверхности необходимо добавить в эквивалентную схему локально-освещенной МДП-структуры [3] сопротивление, характеризующее проводимость между различными точками структуры.

Пусть к полевому электроду при освещении заэлектродных областей движутся электроны (группа А). Тогда сопротивление между подэлектродной и заэлектродной областями максимально при инверсионных напряжениях (вдоль поверхности существует индуцированный полем p - n -переход) и минимально — при обогащенных. Для структур группы Б, случай 1 при освещении заэлектродных областей к электроду движутся дырки. Наличие сигнала, синфазного с сигналом под полевым электродом, в заэлектродных областях связано с реализацией режима инверсии за пределами полевого электрода. Сопротивление между заэлектродной и подэлектродной областями максимально при обогащающих напряжениях (существует индуцированный полем p - n -переход) и минимально в инверсии, когда смыкаются подэлектродный и заэлектродный инверсионные слои.

Если воспользоваться предложенной эквивалентной схемой (рис. 5), то фотоЭДС в локальных точках под полевым электродом для структур групп Б (случай 1) можно записать в следующем виде (для МДП-структур группы А можно использовать те же выражения с учетом иной зависимости $R_i(V)$ и

противоположного направления включения в схему генератора фототока ($k < 0$):

1) фотоЭДС при освещении точек под полевым электродом, генератор тока в эквивалентной схеме подключен к ОПЗ подэлектродной области (см. точки 1, 2 на рис. 5):

$$U_{\text{фЭ}}^{\ominus} = I_{\text{ф}} \frac{Z_{\ominus}(Z_{\text{зЭ}} + R_i)}{Z_{\ominus} + Z_{\text{зЭ}}R_i}, \quad (1)$$

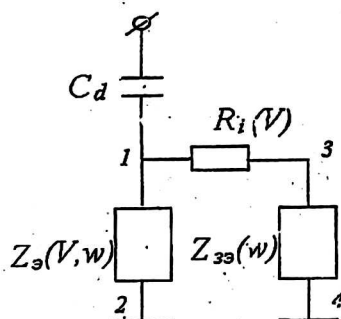
где $R_i(V)$ — сопротивление между подэлектродной и заэлектродной областями;

$Z_{\ominus}(V, \omega)$ — импеданс подэлектродной области;

$Z_{\text{зЭ}}(\omega)$ — импеданс заэлектродной области;

$I_{\text{ф}}$ — фототок.

Рис. 5. Эквивалентная схема МДП-структуры с заэлектродной областью (группа А, группа Б, случай 1)



Из формулы (1) видно, что с уменьшением $R_i + Z_{\text{зЭ}}$ происходит уменьшение локальной фотоЭДС, в случае $R_i > Z_{\text{зЭ}}$ к уменьшению фотоЭДС приводит уменьшение сопротивления между подэлектродной и заэлектродной областями из-за смыкания инверсионных слоев (при возникновении режима инверсии под электродом). Неосновные носители, созданные освещением под полевым электродом, при малом $R_i(V)$ уходят в заэлектродные области, и фотоЭДС уменьшается. Уменьшение величины пика с повышением частоты связано с тем, что импеданс полупроводника обратно пропорционален частоте;

2) фотоЭДС при освещении точек за пределами полевого электрода, генератор тока в эквивалентной схеме подключен к ОПЗ заэлектродной области (см. точки 3 и 4 на рис. 5).

$$U_{\text{фЭ}}^{\text{зЭ}} = kI_{\text{ф}} \frac{Z_{\ominus} Z_{\text{зЭ}}}{Z_{\ominus} + Z_{\text{зЭ}} + R_i}, \quad (2)$$

где k — коэффициент, позволяющий учесть различие фототока под электродом и в заэлектродной области.

Из формулы (2) видно, что с уменьшением $R_i + Z_{\text{зЭ}}$ происходит увеличение локальной фотоЭДС на участке напряжений, соответствующем спаду фотоЭДС, под полевым электродом должен происходить рост фотоЭДС в заэлектродных областях, что и наблюдается в эксперименте. С уменьшением сопротивления в режиме инверсии большая часть неравновесных неосновных носителей, созданных освещением в заэлектродных областях, достигает полевого электрода и вносит вклад в образование фотоЭДС. Для МДП-структур группы А $R_i + Z_{\text{зЭ}}$ уменьшается в обогащении, что приводит к росту заэлектродной фотоЭДС;

3) фотоЭДС при интегральном освещении, в этом случае генераторы фототока подключены к ОПЗ подэлектродной и заэлектродной областей, интегральная фотоЭДС запишется в виде:

$$U_{\text{фЭ}}^i = I_{\text{ф}} \frac{Z_{\text{э}}(Z_{\text{зэ}} + R_i)}{Z_{\text{э}} + Z_{\text{зэ}} + R_i} + kI_{\text{ф}} \frac{Z_{\text{э}}Z_{\text{зэ}}}{Z_{\text{э}} + Z_{\text{зэ}} + R_i} = \frac{Z_{\text{э}}Z_{\text{зэ}} + (k+1)Z_{\text{э}}R_i}{Z_{\text{э}} + Z_{\text{зэ}} + R_i}. \quad (3)$$

Если $Z_{\text{зэ}}(k+1) \gg R_i$, то пик в интегральных измерениях не проявится, а в случае $Z_{\text{зэ}}(k+1) \ll R_i$ пик на интегральной зависимости фотоЭДС от напряжения должен проявиться. Для структур группы А сигналы фотоЭДС от подэлектродных и заэлектродных областей имеют разные знаки ($k < 0$).

Пики на зависимостях фотоЭДС могут проявляться и при перераспределении неравновесных носителей по площади электрода (группа Б, случай 2). В этом случае причиной неравномерного образования инверсионного слоя является неоднородность по потенциалу.

Таким образом, неоднородность электрических свойств МДП-структур иногда приводит к качественному изменению интегральных и локальных фотоэлектрических характеристик МДП-структур, что может быть использовано для управления характеристиками МДП-приборов.

Выводы

Особенности фотоэлектрических свойств Si-МДП-структур с неоднородным по темновому сопротивлению приповерхностным слоем полупроводника определяются наличием двух различных по механизму образования составляющих фотоЭДС, имеющих различные фазы и неодинаковые зависимости от напряжения смещения, частоты и температуры. Причиной разделения неравновесных носителей заряда при освещении подэлектродной области является существование вблизи поверхности потенциального барьера, индуцированного напряжением смещения, а при освещении заэлектродных областей — наличие встроенных полей, созданных неравномерным распределением электрически активных центров в кремнии.

Процессы растекания неравновесных носителей в инверсионном слое МДП-структур приводят к появлению пиков на локальных зависимостях фотоЭДС от напряжения смещения в случае неоднородности по поверхностному потенциалу под полевым электродом, а также в случае существования инверсионного слоя за пределами полевого электрода.

Литература

1. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — г. Томск: Радио и связь, 1990.
2. Давыдов В. Н., Ланская О. Г., Лиленко Е. П., Несмелов С. Н. // Известия вузов. Сер. Физика. 1998. № 5. С. 82—87.
3. Давыдов В. Н., Криулин А. В., Пломину Б. Г., Ушеренко А. А. // Микроэлектроника. 1988. Т. 17. № 4. С. 353—358.

Photoelectric characteristics of inhomogeneous MIS-structures in base of Si, HgCdTe

A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, N. A. Kulchitskii

Siberian Physico-Technical Institute, Tomsk, Russia

In this work the influence of inhomogeneous distribution of resistance of semiconductor's boundary layer and surface potential on integral and local photoelectric properties of MIS-photodetectors is considered.