

величины  $\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2}$ , т. е. для действующего значения низкочастотных компонент электрического поля.

Таким образом, при управлении в конечном интервале соотношением  $t_1/t_2$  может быть получена любая величина фазовой задержки светового пучка из полного диапазона ее изменения. Предложенный метод позволяет сравнительно легко реализовать управление непосредственно от цифровых схем ключевого типа, что удобно при формировании управляющего воздействия с помощью ЭВМ.

В заключение авторы выражают благодарность за полезные обсуждения В.В. Беляеву и А.В. Парфенову.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Н а r d у J.W. – Soc. Phoop. Inst. Eng., 1981, v. 293, p. 214–221.
- [2] Б а р н и к М.И., И в а ш е н к о А.В. – Оптико-механическая промышленность, 1980, № 5, с. 25–29.
- [3] В а с и л ь е в А.А., К о м п а н е ц И.Н., П а р ф е н о в А.В. – Квантовая электроника, 1983, т. 10, № 6, с. 1079–1088.
- [4] Б л и н о в Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
- [5] М а л о в А.Н., Н а у м о в А.Ф. В сб.: Лазеры в народном хозяйстве. М., 1986, с. 84–88.

Физический институт  
им. П.Н. Лебедева АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
10 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 5

12 марта 1988 г.

### КОЛОКОЛООБРАЗНЫЕ C-V ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МТДП СТРУКТУР

В.Н. Д о б р о в о л ь с к и й, С.Т. Ж у б а е в,  
Г.К. Н и н и д з е

Изменение емкости и проводимости структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и металл-туннельно-тонкий диэлектрик-полупроводник (МТДП) под действием различных факторов используется для создания приборов электроники (например, варикап и фотоварикап [1–3]). До сих пор наблюдалось только монотонное изменение емкости области пространственного заряда таких структур с изменением напряжения на полевом электроде и их положительная проводимость. Нами обнаружено, что МТДП структуры описанной в

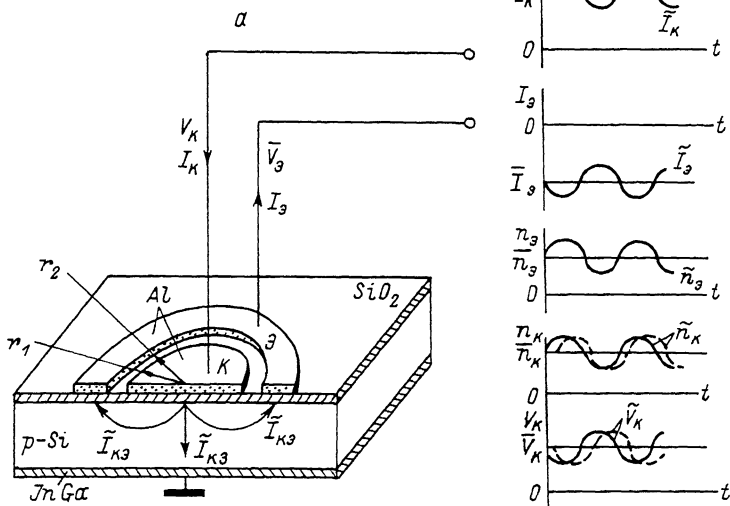


Рис. 1. а - конструкция МТДП-структуры. Толщина  $SiO_2$  27 Å,  $r_1 = 144$  мкм,  $r_2 = 164$  мкм. б - эюры изменения во времени  $I_Э$ ,  $n_Э$ ,  $n_K$  и  $V_K$  в зависимости от изменения  $I_K$ .

[4] конструкции при определенных условиях имеют колоколообразную  $C-V$  характеристику и отрицательную дифференциальную проводимость, что расширяет возможности их использования.

Конструкция исследовавшихся структур показана на рис. 1, а. Они изготовлялись на пластинах кремния р-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см толщиной 200 мкм. К круглому коллектору К и окружающему его кольцевому эмиттеру Э соответственно в запорном и проходном направлениях прикладывались постоянные напряжения  $\bar{V}_K$  и  $\bar{V}_Э$ , которые вызывали токи  $\bar{I}_K$  и  $\bar{I}_Э$ . Увеличение  $\bar{I}_Э$  приводило к росту  $\bar{I}_K$ , что демонстрируют зависимости  $\bar{I}_K$  от  $\bar{V}_K$  на рис. 2, а (кривые 1'–4'), снятые при различных значениях  $\bar{I}_Э$ .

Кроме постоянного напряжения  $\bar{V}_K$  на коллектор подавалось еще переменное напряжение  $\tilde{V}_K$  с частотой  $\nu = 10$  кГц, так что полное напряжение на коллекторе  $V_K = \bar{V}_K + \tilde{V}_K$ , и при разных неизменных  $\bar{I}_Э$  снимались зависимости адмитанса  $Y = G + iC(2\pi\nu)$  между коллектором и землей от  $\bar{V}_K$  ( $G$  - проводимость,  $C$  - емкость,  $i = \sqrt{-1}$ ).

Существенно, что питание эмиттера осуществлялось таким образом, что при  $\bar{V}_Э \neq 0$  переменная составляющая напряжения на эмиттере  $\tilde{V}_Э = 0$ . Полученные зависимости  $G$  и  $C$  от  $\bar{V}_K$  даются кривыми 1–4 рис. 2, а и рис. 2, б соответственно.

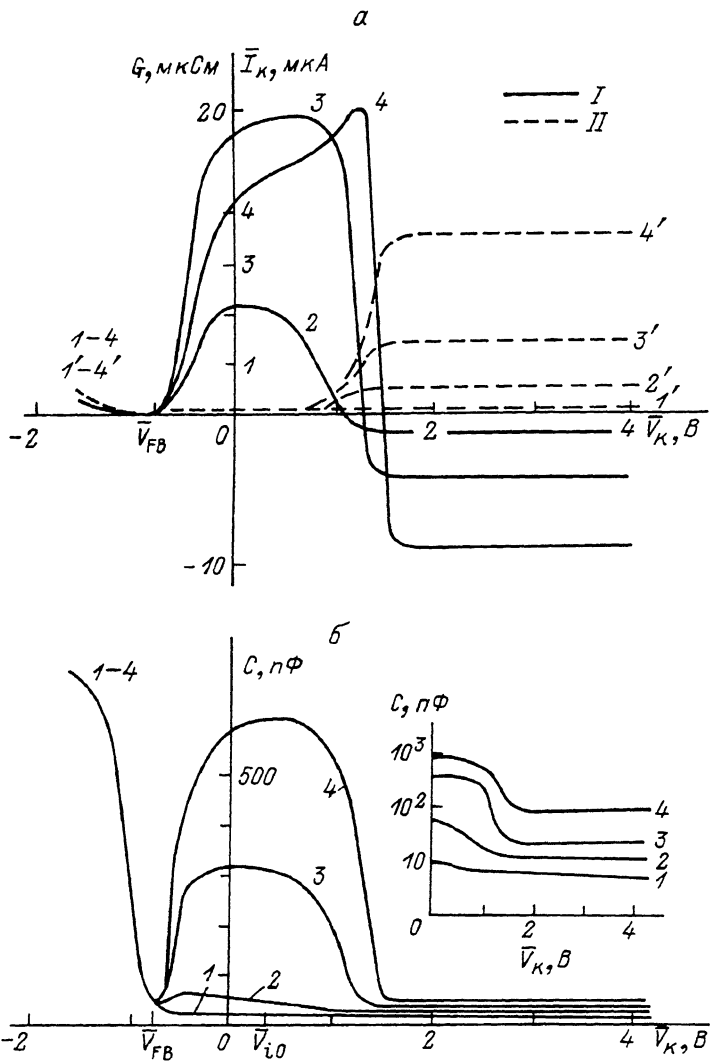


Рис. 2. Зависимости а) проводимости  $G$  (I, кривые 1-4) и тока  $\bar{I}_K$  (II, кривые 1'-4') и б) емкости  $C$  (кривые 1-4) от напряжения на коллекторе  $\bar{V}_K$  при разных значениях  $\bar{I}_B$ , мкА: 1, 1' - 0; 2, 2' - 1; 3, 3' - 4; 4, 4' - 10. Зависимости емкости  $C$  от  $\bar{V}_K$  для  $\bar{V}_K \geq 0$  дополнительно приведены в логарифмическом масштабе.

При  $\bar{I}_B = 0$  проводимость  $G \approx 0$  (кривая 1, рис. 2, а), а зависимость  $C$  от  $\bar{V}_K$  (кривая 1, рис. 2, б) такая, которая многократно наблюдалась на МТДП структурах [4, 5]. По ней были определены указанные на рис. 2, б напряжение плоских зон под коллектором  $\bar{V}_{FB}$  и напряжение  $\bar{V}_{i0}$ , начиная с которого под ним реали-

зуется неравновесное обеднение ( $\bar{V}_i = \bar{V}_{i0}$  при  $\bar{I}_3 = 0$ ) [3, 4]. Увеличение  $\bar{I}_K$  с ростом  $\bar{I}_3$  объясняется инжекцией эмиттером в слой неравновесного обеднения электронов [4, 6].

Емкость  $C$  (кривые 2-4, рис. 2, б) и проводимость  $G$  (кривые 2-4, рис. 2, а) в случае  $\bar{I}_3 \neq 0$  в определенном интервале напряжения  $\bar{V}_K$  изменяются колоколообразно, а при  $\bar{V}_K \approx 1$  В проводимость  $G$  отрицательна. Электроны от эмиттера к коллектору движутся конечное время  $t_{ЭК}$ . Объясним сначала возникновение  $G < 0$ , считая  $t_{ЭК} = 0$ . При сильном обеднении  $V_K = V_{0\delta}$  - падению напряжения на слое обеднения. Переменный ток коллектора  $\bar{I}_K$  разветвляется: часть его  $\bar{I}_{K3}$  протекает на землю непосредственно через пластину, а другая часть  $\bar{I}_{KЭ}$  проходит через эмиттер, после чего также замыкается на землю. Ток  $\bar{I}_{KЭ}$  вызывает схематически показанные на рис. 1, б сплошными волнистыми линиями изменения тока эмиттера  $\bar{I}_3$  и концентраций инжектированных электронов под эмиттером  $\bar{n}_3$  и коллектором  $\bar{n}_K$ , которые синфазны  $\bar{I}_K$ . Инжектируемые под коллектор электроны уменьшают под ним степень неравновесности обеднения и из-за  $V_K = V_{0\delta}$  изменяют напряжение  $V_K$  контрфазно  $\bar{I}_3$ . Как видно из приведенных на рис. 1, б эпюр, цепочка названных изменений величин, вызванная протеканием части тока коллектора через эмиттер, приводит к контрфазности  $\bar{I}_K$  и  $\bar{V}_K$ , что дает  $G < 0$ .

Предложенное объяснение подтверждается тем, что питание эмиттера в режиме, близком к режиму постоянства тока, когда  $\bar{V}_3 \neq 0$ , приводило к уменьшению  $|G|$  на порядки.

Конечность  $t_{ЭК}$  вызывает запаздывание по фазе  $\bar{n}_K$  относительно  $\bar{n}_3$  и  $\bar{V}_K$  относительно  $\bar{I}_K$ , как это показано на рис. 1, б пунктирными линиями. При измерении адмитанса в области смещений  $\bar{V}_K \geq 1$  В это приводит к емкости  $C$  (кривые 2-4 на рис. 2, б), значительно превышающей емкость области неравновесного обеднения при  $\bar{I}_3 = 0$  (кривая 1, рис. 2, б). Считая, что величина  $t_{ЭК}$  определяется диффузией электронов от эмиттера к центру коллектора, получаем  $t_{ЭК} \approx 8 \cdot 10^{-6}$  с. Во всем использованном диапазоне частот  $1 \text{ кГц} \leq \nu \leq 20 \text{ кГц}$  выполнялось неравенство  $\nu \ll \frac{1}{t_{ЭК}}$  и в соответствии с предложенным объяснением  $G$  и  $C$  не зависели от частоты  $\nu$ .

Результаты, подобные описанным, были получены и на структурах, созданных на кремневых пластинах  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 4.5 Ом·см. В них, в отличие от структур на  $p$ -кремнии, из эмиттера инжектировались дырки и  $t_{ЭК} \approx 2.7 \cdot 10^{-5}$  с. При достижении  $\nu \approx \frac{1}{t_{ЭК}}$  эффекты возникновения  $G < 0$  и большой емкости  $C$  ослаблялись и затем исчезали.

Колоколообразный рост  $C$  (кривые 2-4, рис. 2, б) и  $G$  (кривые 2-4, рис. 2, а) начинается с напряжения плоских зон  $\bar{V}_{FB}$ . При  $\bar{V}_K > \bar{V}_{FB}$  напряжение  $\bar{V}_K$  создает под коллектором слой обеднения, представляющий собой потенциальную яму для электронов. Инжектируемые эмиттером электроны входят в яму и, заполняя ее, увели-

чивают емкость  $C$ , а утечка этих электронов через слой диэлектрика приводит к увеличению  $G$ . При этом, чем больше ток эмиттера  $\bar{I}_3$ , тем больше электронов скапливается в яме и больше увеличение  $C$  и  $G$  (сравните, например, кривые 1-4 на рис. 2, а и рис. 2, б, снятые при разных  $\bar{I}_3$ ). По мере увеличения  $\bar{V}_K$  отсос электронов в металл через слой диэлектрика усиливается, что приводит к уменьшению числа электронов в яме, уменьшению  $C$  и  $G$  и при  $\bar{V}_K = \bar{V}_c > \bar{V}_{io}$  к неравновесному обеднению. Колоколообразные  $C - \bar{V}_K$  и  $G - \bar{V}_K$  характеристики наблюдались и при инжекции неравновесных электронов не пропуская ток через эмиттер, а путем освещения структуры. Отрицательные значения  $G$  при этом не реализовались.

Разветвление зависимостей  $C$  и  $G$  от  $\bar{V}_K$ , снятых при разных  $\bar{I}_3$ , можно использовать для определения напряжения плоских зон  $\bar{V}_{FB}$ . По резкому спаду  $C - \bar{V}_K$  и  $G - \bar{V}_K$  зависимостей можно оценивать напряжение начала образования слоя неравновесного обеднения под коллектором при различных уровнях инжекции неосновных носителей.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. Киев, 1978. 315 с.
- [2] Саченко А.В., Снитко О.В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. Киев, 1984. 231 с.
- [3] Зув В.А., Попов В.Г. Фотоэлектрические МДП-приборы. М., 1983. 160 с.
- [4] Clarke R.A., Showshun J. - Solid State Electron., 1971, v. 14, N 10, p. 957-973.
- [5] Вуль А.Я., Зинчик Ю.С., Козырев С.В., Санин К.В., Федоров В.И., Шмарцев Ю.В. - Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, в. 20, с. 1274-1277.
- [6] Showshun J., Clarke R.A. - Solid-State Electron., 1973, v. 16, N 2, p. 213-219.

Киевский государственный университет им. Т.Г. Шевченко

Поступило в Редакцию  
26 ноября 1987 г.