

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СТРУКТУРЕ КРЕМНИЙ—ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ—ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

Г. Е. Невская, И. В. Тихомиров

При исследовании дефектности диэлектрических покрытий на кремниевых пластинах с помощью нематических жидких кристаллов (НЖК) было обнаружено, что результаты измерений зависят от полярности приложенного напряжения [1]. С целью выяснения причин зависимости чувствительности метода от полярности нами исследованы электрооптические явления в ячейке, представляющей собой структуру Si—SiO₂—НЖК, в широком диапазоне толщин SiO₂ и предложена модель для объяснения зависимости результатов эксперимента от полярности напряжения.

При исходной гомеотропной ориентации молекул НЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией ($\Delta\epsilon < 0$) электрическое поле определенной величины (пороговое) вызывает изменения направления директора, характеризующего среднее направление ориентации

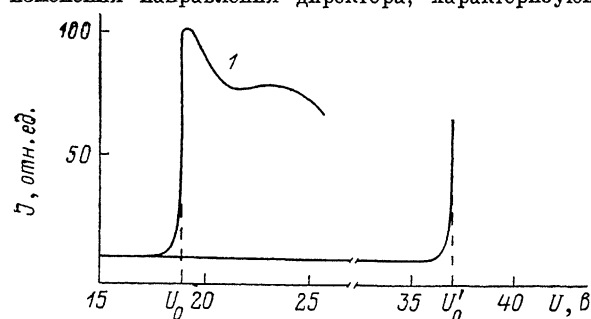


Рис. 1.

молекул ЖК. Соответствующий электрооптический эффект называют *B*-эффектом [2]. Для определения порога *B*-эффекта исследовались вольт-контрастные характеристики (ВКХ) структуры. ВКХ регистрировались самописцем, на вход «у» которого поступал сигнал от фотопумпного усилителя, усиливающего электрооптический отклик структуры. На вход «х» самописца и на структуру подавалось линейно изменяющееся напряжение (скорость развертки $5 \cdot 10^{-4}$ В/с). Пороговое напряжение определялось по резкому росту оптического отражения. Измерения показали, что пороговое напряжение *B*-эффекта U_0 в рассматриваемой структуре зависит от полярности приложенного к ней напряжения: оно ниже при отрицательном потенциале на кремниевой подложке ($U_0 < U'_0$). С ростом толщины SiO₂ наблюдается линейный рост пороговых напряжений и их разности. На рис. 1 представлены результаты измерений для МББА ($\gamma = 5 \cdot 10^{-10}$ Ом⁻¹·см⁻¹).

Рассмотрим влияние границ Si—SiO₂ и SiO₂—ЖК на характер процессов в рассматриваемой структуре. При положительном напряжении (минус на Si), приложенном к структуре в случае *B*-эффекта, в *n*-типе кремния наблюдается состояние обогащения, в *p*-типе — состояние глубокой инверсии. В обоих случаях у поверхности Si будет большая концентрация электронов, чем в объеме. В достаточно сильном электрическом поле наблюдается тунелирование электронов из Si в SiO₂. Плотность тока описывается уравнением Фаулера—Нордгейма [3]

$$j = A_1 E^2 \exp(-A_2/E), \quad (1)$$

где

$$A_1 = q^3/8\pi\hbar\Phi_B \left(\frac{m^*}{m}\right), \quad A_2 = 8\pi \left(\frac{2m^*}{m}\right)^{1/2} \Phi_B^{3/2}/3\hbar q,$$

Φ_B — высота барьера для электронов на границе Si—SiO₂, равная 3.1 эВ; m^* — эффективная масса электрона; E — напряженность электрического поля в SiO₂.

Величину напряженности электрического поля в слое SiO₂ можно оценить, рассматривая SiO₂—ЖК как двухслойный диэлектрик с проводимостью [4]. В начальный момент времени поле в слоях распределится соответственно диэлектрическим проницаемостям, значения которых близки (для МББА 5.0, для SiO₂ 3.8). Однако вследствие неравенства токов проводимости на границе раздела слоев начнет накапливаться свободный положительный заряд. Появление заряда приведет к увеличению поля в двуокиси кремния и уменьшению в слое ЖК. Процесс закончится при равенстве токов проводимости в обоих слоях, т. е. в стационарном

состоянии $j_1 = j_2$. Считая, что в ЖК при напряжении V -эффекта ток подчиняется закону Ома, а в SiO_2 — закону Фаулера—Нордгейма, можно записать

$$\gamma_1 E_B = A_1 E^2 \exp(-A_2/E), \quad (2)$$

где γ_1 — удельная электропроводность ЖК; E_B — напряженность электрического поля в ЖК в момент V -эффекта, равная

$$E_B = \frac{\pi}{L} \left(\frac{4\pi K_{33}}{\Delta\varepsilon} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где K_{33} — модуль упругости при продольном изгибе, L — толщина слоя ЖК.

Формула (2) позволяет рассчитать E при известных значениях γ_1 и L . Для МББА с $\gamma_1 = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и толщиной слоя 20 мкм напряженность поля в SiO_2 равна в момент V -эффекта 7.3 МВ/см. Напряжение на рассматриваемой структуре в момент V -эффекта можно представить следующим образом:

$$U_0 = E_B L + Ed + \Psi_s, \quad (4)$$

где Ψ_s — падение напряжения на кремнии, величина которого обычно менее 0.5 В.

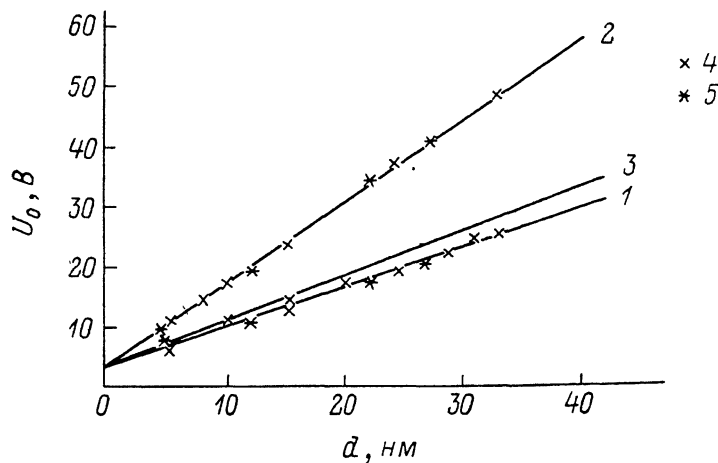


Рис. 2. Зависимость порогового напряжения V -эффекта в МББА от толщины SiO_2 .

1 — положительное напряжение, 2 — отрицательное напряжение, 3 — теоретическая зависимость для положительного напряжения, 4 — n -тип, 5 — p -тип.

На рис. 2 приведена зависимость $U_0(d)$, рассчитанная по формуле (4) для значения $E = 7.3 \text{ МВ/см}$. Получено удовлетворительное согласие с экспериментом (кривые 1, 2). Рассчитана плотность заряда на границе ЖК— SiO_2 $Q^+ = 2.25 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$. При отрицательном напряжении в p -типе кремния наблюдается состояние обогащения, в n -типе — глубокой инверсии, т. е. у границы раздела в кремнии будет большая концентрация дырок, чем в объеме. Туннелирование дырок, как правило, не наблюдается (за исключением сверхтонких окислов менее 5 нм). На границе раздела слоев ЖК— SiO_2 накапливается отрицательный заряд (ионы ЖК), увеличивающий поле в SiO_2 и уменьшающий его в ЖК. Ток проводимости в двуокиси кремния будет обусловлен электронами, инжектированными из ионов слоя ЖК, граничащего с SiO_2 . В стационарном состоянии для момента V -эффекта токи проводимости в слоях диэлектриков одинаковы, т. е.

$$\gamma_1 E_B = A'_1 E'^2 \exp(-A'_2/E'), \quad (5)$$

где A'_1 , A'_2 определяются формулами (1) при замене Φ_B на Φ'_B (потенциальный барьер для электронов на границе ЖК— SiO_2).

Увеличение высоты барьера для электронов в этом случае ($\Phi'_B > \Phi_B$) приводит к росту заряда на границе ЖК— SiO_2 (Q^-), а также к увеличению E' и U_0 по сравнению с соответствующими величинами для положительного напряжения. Экспериментальные данные позволили рассчитать Φ'_B и Q^- , которые соответственно равны 4.3 эВ и $4.40 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$.

Таким образом, зависимость порога B -эффекта структуры $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{ЖК}$ от поляризации приложенного напряжения обусловлена различным влиянием при смене поляризации грани $\text{Si}-\text{SiO}_2$ и $\text{ЖК}-\text{SiO}_2$ на характер физических процессов, протекающих в рассматриваемой структуре, что ведет к накоплению разного по величине заряда на границе $\text{SiO}_2-\text{ЖК}$ и к иному распределению электрических полей.

Литература

- [1] Рубцов А. Е., Невская Г. Е. // Обзоры по электронной технике. Серия 8. Вып. 1. М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. С. 16—17.
 [2] Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
 [3] Szuika H. et al. // IEEE Trans. Electr. Devices. 1976. Vol. ED-23. N 4. P. 379—387.
 [4] Сканиви Г. И. Физика диэлектриков. М., 1949. 498 с.

Новосибирский
электротехнический институт

Поступило в Редакцию
14 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
21 марта 1988 г.

05; 06; 07

Журнал технической физики, т. 59, в. 3, 1989

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ТИПА ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА—ЦЕНДЕРА НА $\text{Ti} : \text{LiTaO}_3$

Р. Римейка, Д. Чиплис, А. Домарька

Среди материалов интегральной оптики привлекает внимание танталат лития, обладающий повышенной по сравнению с ниобатом лития стойкостью к фоторефрактивному эффекту и меньшей анизотропией показателей преломления. Оптические волноводы на LiTaO_3 и

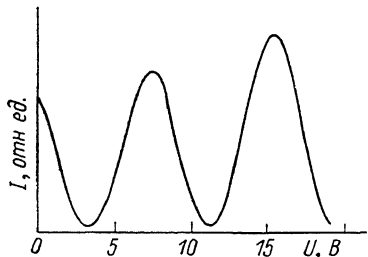


Рис. 1.

электрооптические модуляторы на их основе изготавливались различными методами [1—5]. Перенос наиболее распространенной и дающей хорошие результаты в случае LiNbO_3 методики термодиффузии титана на танталат лития связан с определенными сложностями, обусловленными низкой температурой Кюри (660°C) [6] в LiTaO_3 . Модулятор на основе планарных волноводов $\text{Ti} : \text{LiTaO}_3$ был создан в [2]. Несомненный интерес представляет создание электрооптического модулятора на основе канальных волноводов $\text{Ti} : \text{LiTaO}_3$, в частности интерферометра Маха—Цендера. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Геометрия интерферометрического модулятора подобна использованной нами ранее в LiNbO_3 [7]. На поверхность Y среза образца танталата лития размерами $(20 \times 2 \times 10)$ мм³ напылялся слой Ti толщиной 350 \AA . Рисунок волноводов интерферометра создавался фотолитографическим способом. Волноводы были направлены вдоль оси X кристалла. Ширина полосок Ti в плечах интерферометра составляла 10 мкм . Перед диффузией образец в течение 4 ч выдерживался при температуре 650°C с целью окисления титана. Затем производилась сама диффузия при температуре 1100°C в течение 7.5 ч . Весь нагрев производился в воздухе.

Следующим этапом являлось восстановление электрооптических свойств, исчезающих вследствие нагрева LiTaO_3 выше температуры Кюри. К боковым плоскостям, перпендикулярным оси Z , прижимались титановые электроды. Подачей на них постоянного напряжения в образце создавалось электрическое поле напряженностью от 400 до 600 В/см . Образец с включенным напряжением нагревался до 700°C , выдерживался при этой температуре в течение 20 мин и медленно охлаждался. Наконец, на поверхности Y среза образца фотолитографическим способом изготавливались электроды из Cu для подачи модулирующего напряжения. Длина электродов L составляла 6.7 мм , ширина зазора между ними d равна 12 мкм . Совмещение рисунков волноводов и электродов осуществлялось при помощи заранее нанесенных меток из SiO_2 .