

кристалла в направлении оси  $z$ . В работе [6] было показано, что критические точки идеализированного двумерного кристалла вследствие межслоевого взаимодействия расщепляются на две близко расположенные трехмерные критические точки  $M_i$  и  $M_{i+1}$ , разделенные энергетическим зазором  $\sim 2 I_z$ .

Учитывая такую специфику зонного спектра слоистого кристалла, из анализа кривой 2 получаем величину  $I_z \simeq 25$  мэВ, что позволяет далее оценить приведенную эффективную массу  $\mu_z$ . Принимая  $\gamma_z \simeq 3$  нм [1], находим  $\mu_z \simeq 0.34 m_0$ . Величина напряженности электрического поля в условиях измерений кривой 2 составляет  $F \simeq 3 \cdot 10^4$  В/см, отсюда характерный параметр  $\lambda = 2(I_z/eF)^{2/3} \simeq 6$ . Это позволяет объяснить расщепление пиков в дублетах и появление дополнительных пиков в спектре ЭО, поскольку при данных условиях должны сильно сказываться эффекты непараболичности зон и наложение сигналов от соседних критических точек, приводящее к сложной осциллирующей структуре спектра ЭО [6], качественно подобной наблюдаемой в нашем эксперименте.

В заключение отметим, что с приложением больших модулирующих напряжений тонкая структура спектра ЭО вследствие полевого уширения размывается и спектр ЭО дополнительно уширяется. Поэтому истинное значение столкновительного параметра уширения  $\Gamma_{ст}$  является, вероятно, существенно меньшим, чем величина  $\Gamma$ , найденная из спектров ЭО кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  в ранних работах. В частности, для кристаллов  $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.1}(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{0.9}$  величина  $\Gamma_{ст}$  составляет, по нашим данным, 50—70 мэВ.

#### Список литературы

- [1] Гольдман Б. М., Кудинов В. А., Смирнов И. А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . М., 1972. 320 с.
- [2] Taniguchi K., Moritani A., Hamaguchi C., Nakai J. // Surf. Sci. 1973. V. 37. N 1. P. 212—217.
- [3] Balzarotti A., Burattini E., Picozzi P. // Phys. Rev. 1971. V. B3. N 4. P. 1158—1167.
- [4] Sobolev V. V., Shutov S. D., Popov Yu. V., Shestatskii S. N. // Phys. St. Sol. 1968. V. 30. N 1. P. 349—354.
- [5] Grasso V., Mondio G., Saitta G. // Phys. Lett. 1973. V. 42A. N 7. P. 525—526.
- [6] Sasaki Y., Hamaguchi C., Moritani A., Nakai J. // J. Phys. Soc. Japan. 1974. V. 36. N 1. P. 179—186.
- [7] Aspnes D. E., Handler P., Blossey D. F. // Phys. Rev. 1966. V. 166. N 3. P. 921—933.

Институт полупроводников  
АН УССР  
Киев

Получено 25.06.1990  
Принято к печати 7.07.1990

ФТП, том 24, вып. 11, 1990

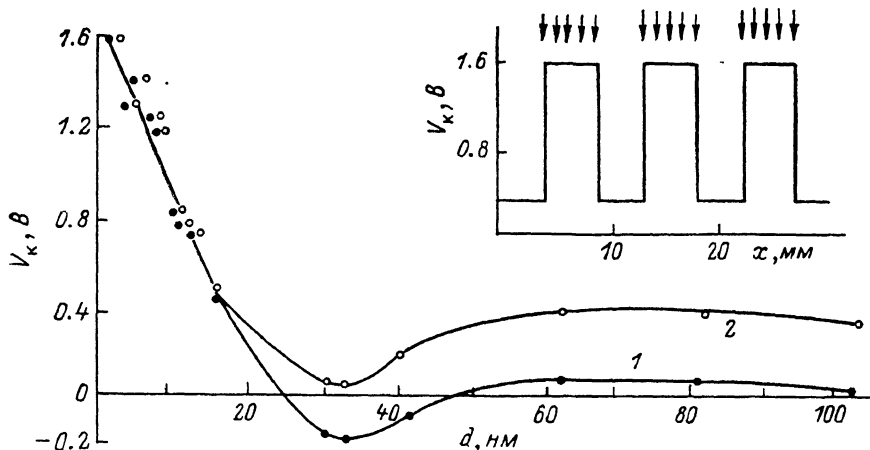
## УФ СТИМУЛИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ $\text{Si}-\text{SiO}_2$

Жарких Ю. С., Тычкина С. В.

Обнаружен эффект долговременного изменения зарядового состояния внешней поверхности окисной пленки на кремнии под действием ультрафиолетового (УФ) облучения.

Исследовали кремниевые пластины ( $p$ -тип,  $\rho \approx 4.5$  Ом·см), окисленные при температуре 930 °С в потоке сухого очищенного кислорода. Изменением времени окисления получен набор пластин с толщинами  $d$  пленок  $\text{SiO}_2$  от 2 до 100 нм. Измеряли контактную разность потенциалов (КРП) между исследуемой пластиной и колеблющимся над ней платиновым электродом ( $\varnothing$  0.5 мм). Перед измерениями проводили УФ облучение пластины лампой ДРШ-250 через экран с рядом отверстий. Затем, передвигая пластину под отсчетным электродом, снимали распределение величины КРП  $V_K$  по координате  $x$  вдоль

ряда чередующихся УФ облученных и необлученных областей. Типичное распределение  $V_k(x)$  показано на вставке к рис. 1. Видно, что УФ облучение приводит к существенному росту величины КРП. Это новое значение  $V_k$  сохраняется длительное время (более 6 месяцев). Возврат к исходному значению  $V_k$  (нижние полки распределения  $V_k(x)$  на рисунке) достигался кратковременной (секунды) промывкой образцов в воде или в другой полярной жидкости. С учетом того, что такая обработка затрагивает только наружные слои системы Si/SiO<sub>2</sub>, можно заключить, что рассматриваемый эффект обусловлен физическими процессами, происходящими на внешней поверхности пленки SiO<sub>2</sub>. «Запись» скачков  $V_k$  УФ облучением и их «стирание» отмывкой можно было многократно повторять без заметного ослабления эффекта. Установлено, что обратимое стирание скачков  $V_k$  может быть произведено также  $\gamma$ -облучением дозой  $\sim 10^5$  рад или термоотжигом образцов в вакууме при  $T \geq 430$  °С. Исследована кинетика этого отжига для разных температур и методом сечений [1] определена его энергия активации ( $E_a \geq 4.9$  эВ).



Зависимость предельных значений  $V_k$  от толщины пленки  $d$ .

На вставке — распределение  $V_k(x)$ ; стрелками указаны УФ облученные области.

Обнаружено, что эффект имеет резкую красную границу. Из всего спектра лампы ДРШ-250 к изменению  $V_k$  приводит только облучение линиями с энергией квантов  $E \geq 4.9$  эВ, хотя на их долю приходится  $\sim 0.4$  % от всей излучаемой мощности. При исследовании кинетики изменения КРП под действием УФ установлено, что величина  $V_k$  растет с увеличением дозы облучения  $D$  тем быстрее, чем тоньше пленка окисла. Зависимость  $V_k(D)$  стремится к насыщению при  $D \geq 3 \cdot 10^{18}$  кв/см<sup>2</sup>. Значения КРП в насыщении однозначно определялись толщиной  $d$  пленки SiO<sub>2</sub> и не зависели от того, какое значение  $V_k$  было перед облучением образцов. На рисунке приведены результаты измерений предельных значений  $V_k$  на образцах с разными толщинами SiO<sub>2</sub>. Измерения проводили дважды: в темноте определяли  $V_k^t$  (кривая 1), при освещении образца лазером с  $\lambda \approx 0.63$  мкм (кривая 2) —  $V_k^c$ . По разнице значений  $V_k^t - V_k^c$  оценивали величину и знак изгиба зон  $Y_s$  на поверхности кремния [2].

Поскольку уменьшение  $V_k$  и возврат к исходному уровню достигались и промывкой образцов, и их термоотжигом, эффект возрастания  $V_k$  нельзя объяснить простой дегидратацией поверхности SiO<sub>2</sub> под действием УФ. На основании всех приведенных экспериментальных данных и с учетом [3, 4] можно заключить, что эффект вызван УФ возбуждением в кремнии горячих электронов, способных преодолеть энергетический барьер высотой  $\sim 4.9$  эВ в системе Si/SiO<sub>2</sub> и локализоваться на внешней поверхности окисной пленки. О накоплении отрицательного заряда свидетельствуют изменения  $V_k$  в сторону положительных значений и  $Y_s$  — в сторону отрицательных значений после УФ облучения образцов. Отметим, что на образцах с тонкими окисными пленками возрастание

$V_k$  происходит при  $Y_s \approx 0$  (на рисунке  $V_k^t - V_k^c \approx 0$  при  $d < 15$  нм). Существенные изменения  $V_k$  при постоянном изгибе зон могут происходить, если на поверхности образуются диполи [2]. Согласно [4], наиболее вероятной причиной возникновения диполей является образование напряженных поляризованных связей  $Si^+ = O^-$ . В нашем случае они могут возникать за счет энергии, выделяющейся при остывании горячих электронов. Образующийся при этом дипольный слой, а также отрицательные заряды на поверхности  $SiO_2$  приводят к изменению эффективной работы выхода из кремния, что и обнаруживается по изменению КРП после УФ воздействия. Отмывки,  $\gamma$ -облучение, термоотжиг, обуславливая стекание заряда и разрушение связей  $Si^+ = O^-$ , восстанавливают исходное состояние поверхности  $SiO_2$ .

При обсуждении немонотонной зависимости  $V_k(d)$  на рисунке обратим внимание на данные, подтверждающие предложенный механизм влияния УФ на систему  $Si/SiO_2$ . Резкий спад  $V_k$  с ростом  $d$  ( $5 < d < 20$  нм) попадает в область толщин, при которых структура  $SiO_2$  перестраивается от коэсито- к тридимитоподобной [4]. Плотность ловушек и напряженных связей при завершении такого структурного перехода закономерно уменьшается. Кроме того, при утолщении пленки  $SiO_2$  все меньшее число горячих электронов достигает ее поверхности. По мере дальнейшего утолщения пленки возрастает вероятность генерации электронов непосредственно в объеме  $SiO_2$ . Этим может быть вызвано небольшое возрастание  $V_k$  при  $d > 35$  нм.

В заключение отметим, что обнаружение УФ стимулированного изменения зарядового состояния свободной поверхности системы  $Si/SiO_2$  стало принципиально возможным благодаря применению методики динамического конденсатора, в которой металлический электрод не касается поверхности  $SiO_2$  и поэтому не экранирует заряд на ней и не разрушает то состояние поверхности, которое создано под действием УФ.

#### Список литературы

- [1] Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. М., 1966. 282 с.
- [2] Жарких Ю. С., Евдокимов А. Д., Полтавцев Ю. Г. // Электрон. техн. Сер. 6. 1983. № 9. С. 67—71.
- [3] Лисовский И. П. // УФЖ. 1979. Т. 24. В. 12. С. 1866—1872.
- [4] Grunthaner F. J., Grunthaner P. J. // Mater. Sci. Rep. 1986. V. 1. N 2-3. P. 65—160.

Киевский государственный  
университет им. Т. Г. Шевченко

Получено 26.06.1990  
Принято к печати 7.07.1990

ФТП, том 24, вып. 11, 1990

## КУЛОНОВСКАЯ ЩЕЛЬ В СПЕКТРЕ СОСТОЯНИЙ $\alpha$ -CdGeAs<sub>2</sub><Fe>

Окунев В. Д., Пафомов Н. Н.

Работы, демонстрирующие влияние кулоновской щели в спектре состояний аморфных полупроводников на их низкотемпературную проводимость, являются пока редкими [1-3]. Возникающие здесь трудности связаны, скорее всего, с химическим взаимодействием примесных атомов с атомами основного вещества: образование включений новой аморфной фазы не только лимитирует электрическую активность примесей, но и способно оказать прямое влияние на характер температурной зависимости электропроводности образцов. Не случайно кулоновская щель для этого класса материалов была впервые обнаружена при исследовании ионно-легированных пленок аморфного кремния [1-3], поскольку метод ионного легирования обеспечивает наиболее однородное распределение примесных атомов по сравнению со всеми существующими в настоящее время