

ОДНОМЕРНАЯ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НА ВЫСОКОИНДЕКСНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ

Б. З. Ольшанецкий, А. В. Ржанов

На границе раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$ у высокоиндексных поверхностей кремния методом дифракции медленных электронов обнаружена периодическая структура в виде системы атомных ступеней, которая может быть причиной возникновения сверхрешеточных эффектов на таких поверхностях.

В последнее время появились сообщения о том, что в электронных инверсионных слоях на высокоиндексных поверхностях кремния наблюдаются такие эффекты, как аномалии в проводимости канала [1], резкая анизотропия ИК поглощения [2] и др., которые связаны с наличием энергетической щели в электронном спектре. Существование щели объясняется в настоящее время двумя альтернативными моделями: моделью долинного расщепления [3] и влиянием кристаллического потенциала, обусловленного новой трансляционной симметрией на высокоиндексных поверхностях [4]. Однако обе эти модели не являются полными и окончательными [5]. В них, в частности, не учитывается реальная структура границы раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$ у высокоиндексных поверхностей кремния, поскольку такие данные, основанные на прямых экспериментальных исследованиях, до настоящего времени отсутствовали.

Целью данной статьи является сообщение о том, что на границе раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$ у высокоиндексных поверхностей кремния в процессе окисления формируется одномерная периодическая структура в виде системы атомных ступеней с одинаковой высотой h и шириной террасы L , с которой могут быть связаны упомянутые эффекты. Об этом свидетельствуют картины дифракции медленных электронов (ДМЭ), полученные от поверхностей кремния, отклоненных на разные углы от плоскостей (100) и (111), после окисления поверхности по общеприня-

той технологии в сухом и влажном кислороде при температурах $1050 + 1150^{\circ}\text{C}$ на глубину около одного микрона и последующего удаления слоя окисла в концентрированной плавиковой кислоте [6]. На этих картинах ДМЭ (рис. 1) рефлексы в зависимости от энергии первичных электронов наблюдаются в виде синглетов или в виде дублетов.

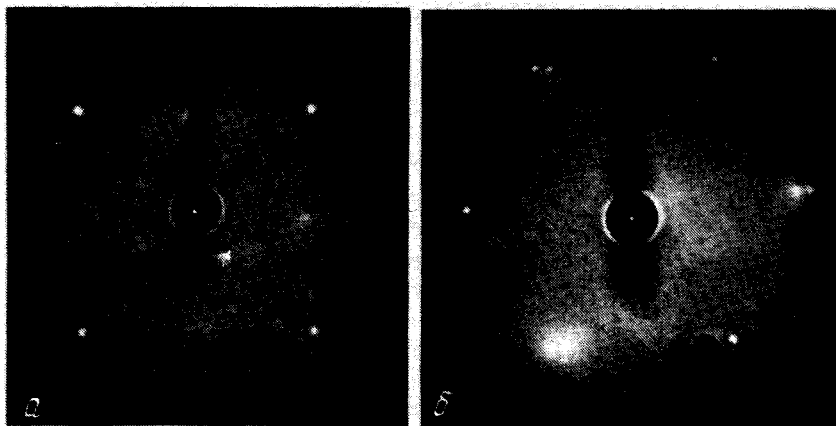


Рис. 1. Картины ДМЭ от поверхностей кремния: *a* – угол $7^{\circ}20'$ с плоскостью (100). Энергия электронов 53 эВ; *б* – угол $4^{\circ}40'$ с плоскостью (111). Энергия электронов 46 эВ

Расщепление рефлексов в дублеты указывает на наличие упорядоченных систем атомных ступеней [7]. Ориентация террас ступеней соответственно (100) и (111). Условием появления синглета является равенство целому числу волн разности хода при рассеянии от соседних террас. Соотношение между величинами ускоряющего напряжения для первичных электронов V , при которых наблюдаются синглеты, и высотой ступеней h получается из формулы Вульфа – Брэгга и для зеркального рефлекса OO при нормальном падении первичного пучка имеет вид

$$V = \frac{37,5 n^2}{h^2},$$

где n – порядок дифракции. Высота ступеней определялась по наклону зависимостей $n^2 = f(V)$, полученных экспериментально. Ширина террасы находилась по известному углу наклона поверхности и высоте ступеней и проверялась по угловому расщеплению рефлексов [8]. Измеренная высота ступеней на поверхностях, принадлежащих зоне [011] и ориентированных вблизи плоскости (100), равна двойному межплоскостному расстоянию d_{100} , т. е. $2,72 \text{ \AA}$, а на поверхностях, принадлежащих той же зоне, но ориентированных вблизи плоскости (111), высота ступеней с фронтом по $[11\bar{2}]$ и $[\bar{1}\bar{1}2]$ равна межплоскостному расстоянию d_{111} , т. е. $3,14 \text{ \AA}$. К такому же результату приводило проведение двух

и трех циклов окисления и снятия окисла. Как известно, растворяя окисел, плавиковая кислота не травит поверхность кремния [9].

Наличие описанной периодической структуры должно приводить к появлению сверхрешеточного потенциала, который и может обусловить эффекты, описанные в [1 - 3]. Поскольку при изменении угла наклона поверхности к плоскости (100) или (111) высота ступеней остается постоянной, а меняется ширина террасы, определяющей период этого потенциала (рис. 2), то последний можно изменять, выбирая соответствующим образом, ориентацию поверхности.

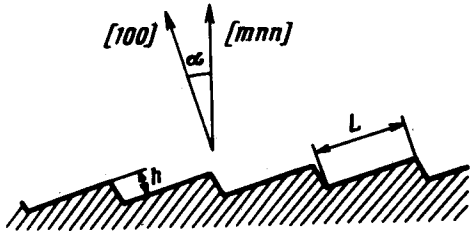


Рис. 2. Система ступеней на поверхности кремния с ориентацией (mnn) под слоем окисла. α — угол наклона поверхности к плоскости (100)

Теоретически на возможность получения одномерных периодических структур путем формирования на поверхности полупроводников системы атомных ступеней впервые указывалось в [10]. Оценка величины первой энергетической щели по [10] дает для описанной периодической структуры величину $10^{-3} + 10^{-2}$ эВ, что соответствует результатам, наблюдавшимся в экспериментах.

Авторы благодарят Э.Д. Квона за полезные обсуждения.

Институт физики полупроводников
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
13 мая 1980 г.
После переработки
17 июля 1980 г.

Литература

- [1] T. Cole, A.A. Lakhani, P.J. Stiles. Phys. Rev. Lett., 38, 723, 1977.
- [2] D. Tsui, S.I. Allen, Jr., R.A. Logan, A. Kamgar, S.N. Coppersmith. Surface Sci., 73, 419, 1978.
- [3] L.J. Sham, S.I. Allen, A. Kamgar, D.C. Tsui. Phys. Rev. Lett., 40, 472, 1978.
- [4] В.А. Волков, В.Б. Сандомирский. Письма в ЖЭТФ, 27, 688, 1978.
- [5] T. Ando. Valley splitting and related phenomena in Si inversion layers. Yamada Conference II on electronic properties of two-dimensional systems. Japan, 1979, p. 607.
- [6] Б.З. Ольшанецкий, А.В. Ржанов, А.А. Шкляев. Полупроводниковая структура. Авторское свидетельство №710086. БИ, 2, 215, 1980.
- [7] W.P. Ellis, R.L. Schwoebel. Surface Sci., 11, 82, 1968.
- [8] M. Henzler. Surface Sci., 19, 159, 1970.

[9] Б.З.Ольшанецкий, А.В.Ржанов, Ф.Л.Эдельман. ФТП, 7, 2312, 1973.

[10] В.А.Петров, VI Всесоюзное совещание по физике поверхностных явлений в полупроводниках, Киев, 1977, ч. 2, стр. 80; ФТП, 12, 380, 1978.
