

- [1] Мошалаков В.В., Брандт Н.Б. и др. Проблемы ВТСП. Инф. материалы, ч. 1. Свердловск: УрО АН СССР, 1987, с. 8.
- [2] Бельски М., Вендик О.Г. и др. - ФТТ, 1987, т. 29, с. 2953.
- [3] Nagel M., Hein M. et al. - J of Mag. and Magnetic Material, 1987, v. 68, 1, p. L1-L5.
- [4] Farrell D.E. et al. - Phys. Rev. B, 1987, v. 35, p. 8797.
- [5] Лихарев К.А. Введение в динамику Джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985, с. 319.

Ленинградский электротехнический
институт им. В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию
1 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 21 12 ноября 1988 г.

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ:
КОНТРОЛЬ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ И ЛАЗЕРНОЙ ДЕСОРБЦИИ

С.А. Комолов, Т.О. Артамонова,
И.В. Барышев, Э.Ф. Лазнева,
И.Н. Федоров

Приведены результаты параллельных исследований процесса лазерной очистки поверхности кремния от окисной пленки методами низкоэнергетической электронной спектроскопии полного тока [1], Оже-электронной спектроскопии и масс-спектроскопического анализа компонент лазерной десорбции [2]. Спектроскопия полного тока, дающая информацию об энергетическом распределении плотности электронных состояний в приповерхностной области, применялась для контроля за электронной структурой поверхности. Элементный состав поверхности контролировался методом Оже-спектроскопии. Характеристики десорбируемых частиц регистрировались время-пролетным методом энерго- и масс-анализа лазерной десорбции.

В качестве образцов использовались пластинки кремния р-типа (КДБ 7.5) с ориентацией грани (100), на которой выращивался защитный слой искусственного окисла. Очистка поверхности от окисла осуществлялась излучением неодимового лазера с длиной волны 1.0 мкм, длительностью импульса 15 нс и энергией кванта 1.17 эВ, диапазон используемых плотностей энергии 2-5 Дж/см². Лазерный луч фокусировался на участок поверхности площадью порядка

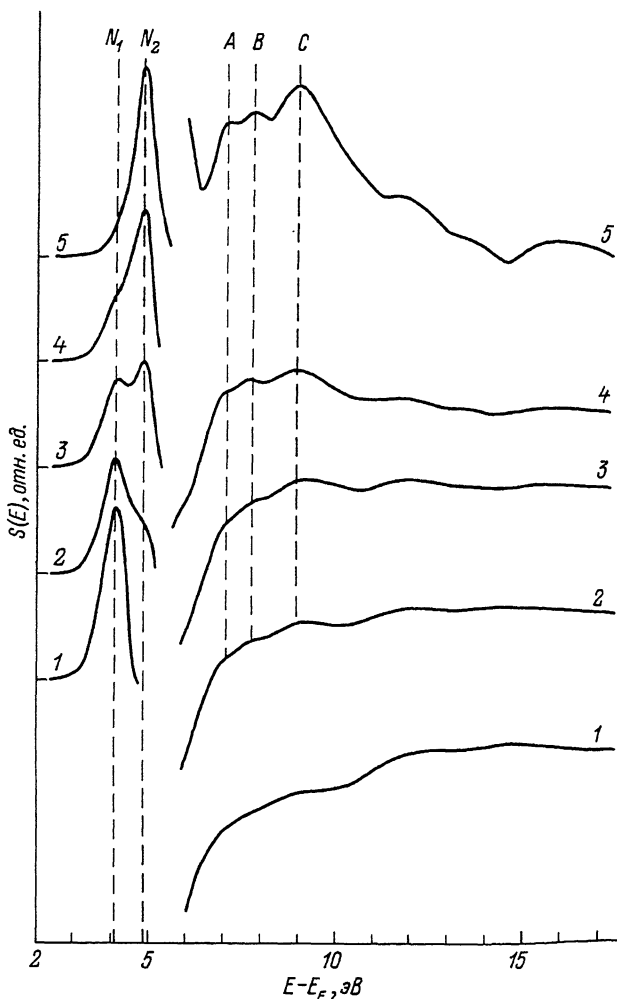


Рис. 1. Изменение спектров полного тока поверхности $\text{Si}(100)$ при лазерной очистке. 1 - исходная поверхность с защитным слоем окисла; 2, 3, 4, 5 - после облучения лазером с плотностью энергии 2.8 Дж/см^2 ; 2 - 10 импульсов, 3 - 40 импульсов, 4 - 80 импульсов + 40 импульсов при облучении соседних точек, 5 - при сканировании по площади $\sim 0.04 \text{ см}^2$. Отсчет энергии ведется от уровня Ферми E_F кремния. Кривые смещены по оси ординат.

$1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$, этот же участок облучался зондирующим электронным пучком. Сведение оптического и электронного пучков в одну точку осуществлялось по максимальному сигналу фотопотенциала, измеряемого по сдвигу первичного максимума спектра полного тока.

Тонкая структура спектров полного тока, полученных до начала очистки, соответствует электронной структуре окисла кремния (рис. 1, кривая 1). Энергетическое положение первичного максимума N_1 (4.1 эВ от уровня Ферми) свидетельствует о наличии на поверхности углерода. На Оже-спектре этой поверхности также наблюдается четкий пик углерода (272 эВ) и небольшие пики оксида кремния (64 и 76 эВ). При облучении участка поверхности лазерными импульсами с плотностью энергии порядка 2.0 Дж/см^2 Оже-пик углерода начинает уменьшаться, а при увеличении плотности до 2.4 Дж/см^2 его амплитуда падает в два раза. При этом в спектре полного тока происходит небольшое изменение положения первичного максимума (0.1–0.2 эВ), что можно объяснить очисткой поверхности окисла от углерода.

При облучении поверхности импульсами с плотностью энергии порядка 2.8 Дж/см^2 в спектре полного тока происходит раздвоение первичного максимума (рис. 1, кривая 2), что свидетельствует о появлении на поверхности пятен с другой работой выхода. Один из максимумов N_1 расположен на старом месте (4.1 эВ от уровня Ферми), а другой N_2 на 0.75 эВ правее. Полученное значение потенциала поверхности 4.85 эВ соответствует работе выхода чистой поверхности грани (100) кремния. Таким образом, на начальной стадии лазерной очистки в окисле образуются отверстия, сквозь которые электроны достигают чистой поверхности кремния. При продолжении облучения компонента первичного максимума, соответствующая окисленной поверхности, убывает, а соответствующая чистой поверхности – растет. Динамика изменения структуры первичного максимума прослеживается на рис. 1. Изменения интенсивности компонент первичного максимума в процессе лазерной очистки показаны на рис. 2, кривые 1 и 2. Каждой точке на графике соответствует облучение десятью последовательными импульсами с плотностью энергии $\sim 2.8 \text{ Дж/см}^2$. Постепенно интенсивности максимумов перестают меняться и кривые выходят на насыщение. При облучении соседних точек поверхности, сдвинутых на 0.2 мм от точки совпадения лазерного и электронного пучков, очистка поверхности продолжается. В результате был получен первичный максимум с наплывом на левом крае (рис. 1, кривая 4), который при дальнейшем облучении не меняется. То, что первичный максимум перестает меняться при облучении одной точки поверхности и затем соседних с ней, можно объяснить установлением динамического равновесия между очисткой облученной поверхности и диффузией в эту область примесных атомов с окружающих неочищенных участков. Только при облучении большей области поверхности, чем зондируется электронным пучком, был получен узкий первичный максимум, соответствующий чистой поверхности (рис. 1, кривая 5). На рис. 2 моменты начала облучения соседних участков и большей области показаны стрелками на оси количества импульсов.

Следует отметить, что отношения интенсивностей компонент первичного максимума пропорционально отношению площадей участков окисленной и чистой поверхности. Динамика изменений тонкой струк-

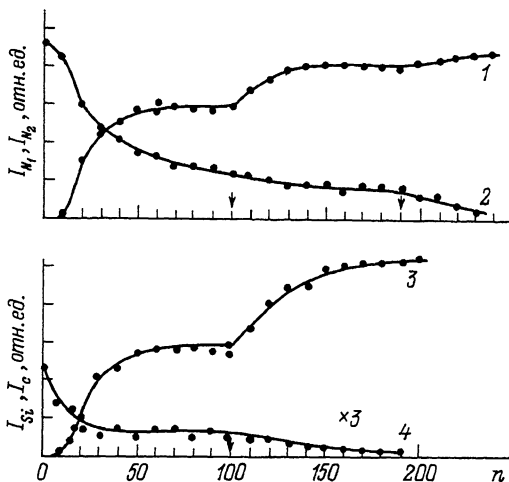


Рис. 2. Изменение первичного максимума и элементного состава поверхности $Si(100)$ при лазерной очистке. 1, 2 – изменение интенсивностей I_{N_1} и I_{N_2} компонент первичного максимума; 3, 4 – изменение амплитуд Оже-пиков кремния I_{Si} и углерода I_C . n – число лазерных импульсов с плотностью энергии 2.8 Дж/см^2 .

туры в процессе очистки также показана на рис. 1. Общий вид конечного спектра и энергетическое положение его наиболее характерных максимумов А, В и С (рис. 1, кривая 5) являются такими же, как для чистой поверхности кремния, полученной при стандартной термической очистке. Анализ показывает, что любой из спектров на промежуточном этапе очистки (кривые 2–4) представляет собой суперпозицию спектров исходной (кривая 1) и очищенной (кривая 5) поверхностей, взятых с коэффициентами, пропорциональными площадям неочищенной и очищенной поверхностей. Следовательно, изменение интенсивности тонкой структуры по мере очистки поверхности происходит пропорционально площади очищенной поверхности. При дальнейшем облучении поверхности импульсами с большей плотностью энергии происходит некоторое перераспределение интенсивностей между тремя основными максимумами А, В и С, что связано с перераспределением плотности электронных состояний.

Очистка поверхности от окисла сопровождается появлением и последующим ростом Оже-линии кремния (92 эВ). На рис. 2 показано изменение амплитуд Оже-пиков кремния (кривая 3) и углерода (кривая 4) в зависимости от числа облучений. Сравнение кривых 3 и 1 на рис. 2 показывает, что изменение Оже-пика кремния пропорционально площади очищенной поверхности.

Параллельно с измерением спектров полного тока и Оже-электронов в процессе очистки проводился масс-анализ частиц, десорбируемых под действием лазерного импульса. С поверхности, покрытой

окислом, наблюдается лазерная десорбция молекул SiO и атомов Si . Очистка поверхности от окисла сопровождается следующими тенденциями. Сигнал десорбции SiO ослабляется в соответствии с уменьшением доли поверхности, покрытой окислом, ослабляется также и сигнал атомарного кремния. Появление островков очищенного кремния сопровождается появлением эмиссии ионов Si^+ . Последующее повышение энергии в импульсе приводит к увеличению выхода ионов Si^+ и атомов кремния, десорбция которых с атомно-чистой поверхности кремния происходит при больших интенсивностях излучения, чем с окисленной поверхности, как это было показано в работе [3].

Можно сделать вывод, что очистка поверхности кремния от окисла под действием нано-секундных импульсов неодимового лазера ($h\nu = 1.17$ эВ) начинается при плотности энергии в импульсе ~ 2.8 Дж/см². При этом в окисле образуются отверстия, открывая участки чистой поверхности кремния. По мере очистки происходит увеличение этих участков. Поверхность, полученная в результате лазерной очистки, характеризуется спектрами полного тока и Оже-электронов, аналогичными спектрам атомарно-чистой поверхности кремния.

Л и т е р а т у р а

- [1] Комолов С.А. - Поверхность, 1985, № 5, с. 5-21.
- [2] Лазнева Э.Ф., Туриев А.М. - ПТЭ, 1984, № 4, с. 125-127.
- [3] Лазнева Э.Ф., Федоров И.Н. - Письма в ЖТФ, 1988, т. 14, в. 6, с. 537-541.

Поступило в Редакцию
3 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 21 12 ноября 1988 г.

ЭФФЕКТ Понижения температуры эпитаксии при конденсации ионно-молекулярного потока

А.Г. Б уд р е в и ч, А.С. Л ю т о в и ч,
Б.Л. О к с е н г е н д л е р

1. Э к с п е р и м е н т

В ряде работ [1, 2] установлено, что введение ионизованной составляющей молекулярного потока приводит к эффективному понижению температуры эпитаксии (T_e). Для конденсации ионно-молекулярного потока кремния на разогретой подложке сапфира [2], получена зависимость T_e от степени ионизации потока α в различных диапазонах энергии и углов падения ионов (рис. 1). Заметное