

- [1] Орлов А.Н., Петров Р.П., Петров Ю.Н. – ЖТФ, 1983, т. 53, № 5, с. 883–887.
- [2] Карлов Н.В., Мешковский И.К., Петров Р.П., Петров Ю.Н., Прохоров А.М. – Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, № 1, с. 48–52.
- [3] Кравченко В.А., Петров Ю.Н., Суров С.П., Сычугов В.А. – Высокочистые вещества, 1987, т. 1, в. 3, с. 94–98.
- [4] Карлов Н.В., Орлов А.Н., Петров Ю.Н., Прохоров А.М. – Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, № 7, с. 426–428.
- [5] Карлов Н.В., Орлов А.Н., Петров Ю.Н., Прохоров А.М., Сурков А.А., Якубова М.А. – Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, № 2, с. 69–72.
- [6] Орлов А.Н. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 3, с. 183–187.
- [7] Бразовский В.Е., Бразовская Н.В. – КЭ, 1986, т. 13, № 7, с. 1401–1408.
- [8] Карлов Н.В., Лагучев А.С., Петров Ю.Н., Прохоров А.М., Якубова М.А. – Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 41, № 9, с. 384–386.
- [9] Жданов В.П., Замараев К.И. – УФН, 1986, т. 149, № 4, с. 635–670.

Институт общей физики
АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
30 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 6

26 марта 1988 г.

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Э.Ф. Л а з н е в а, И.Н. Ф е д о р о в

В работе приведены результаты исследования испарения положительных ионов и атомов кремния с атомно чистой поверхности кремния при воздействии светового импульса наносекундной длительности. Эмиссия вызывалась излучением неодимового лазера, длительность импульса составляла 15 нс, энергия кванта света равнялась 1.17 эВ, площадь облучения $\sim 10^{-3}$ см². В эксперименте регистрировались масс-спектры положительных ионов, нейтральных частиц и энергетические распределения атомов кремния. В качестве образцов использовались прямоугольные пластинки, вырезанные из технологических шайб монокристаллического кремния р-типа двух

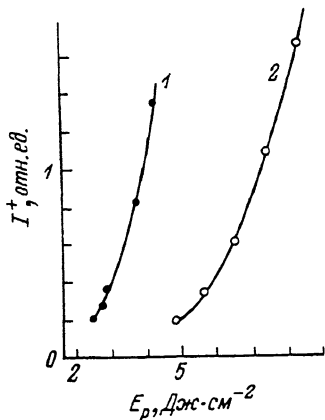


Рис. 1. Зависимость интенсивности эмиссии ионов Si^+ от плотности энергии возбуждающего излучения: 1 - для грани (100) Si^+ , 2 - для грани (111) Si^+ .

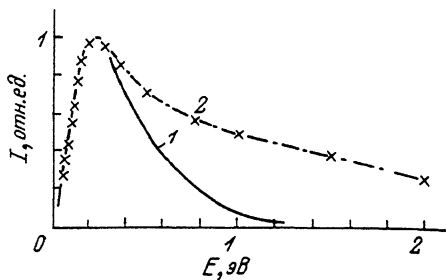


Рис. 2. Сравнение экспериментального времяпролетного распределения (кривая 1) с рассчитанным максвелловским (2).

ориентаций (100) и (111) с удельным сопротивлением 7.5 Ом·см. Атомно чистая поверхность получалась путем прогрева в сверхвысоком вакууме (1250 °C) образцов, прошедших предварительно специальную обработку. После очистки поверхности наблюдалась эмиссия ионов кремния Si^+ и Si_2^+ . Характерно, что интенсивность выхода Si^+ примерно на порядок выше, чем Si_2^+ .

Результаты исследований показали, что закономерности выхода ионов кремния с граней (100) и (111) различны. Зависимость интенсивности эмиссии ионов от плотности энергии лазерного излучения представлена на рис. 1. Пороги появления ионов равны 2.5 и 4.9 Дж/см² для граней (100) и (111) соответственно. После порога происходит резкое увеличение эмиссии. Сдвиг эмиссионной кривой для грани (111) в область больших энергий возбуждения можно понять, приняв во внимание геометрию исследованных поверхностей. На грани (111) поверхностный атом связан с кристаллом тремя связями, а на грани (100) - только двумя. Следовательно, удаление частицы с поверхности (100) требует меньших затрат энергии.

Наряду с ионной эмиссией изучалось испарение нейтральных атомов кремния. Производилось измерение энергетических распределений методом времяпролетного энергомасс-анализа [1]. Было обнаружено, что пороги появления кремния в нейтральном виде выше, чем в виде положительных ионов, и равны для атомов кремния на грани (100) 4.6 Дж/см² и 6.7 Дж/см² на грани (111). Следует отметить, что сигнал атомов кремния очень слабый и наблюдается лишь на пороге чувствительности. При этих пороговых плотностях энергии существует значительный разброс ионов по скоростям. При

некоторых облучениях с теми же плотностями энергии фиксируется свечение плазмы. Можно сказать, что сигнал атомов кремния появляется при плотностях энергии излучения вблизи порога плазмообразования.

На рис. 2 приведены энергетические распределения атомов кремния. Экспериментальное времяпролетное распределение, перестроенное в энергетической шкале (кривая 1), сравнивается с аналогичным распределением в предположении исходного максвелловского распределения с эффективной температурой 2800 К (2). Сравнение экспериментального и максвелловского распределений показывает, что они достаточно хорошо совпадают в области малых энергий и сильно различаются при энергии больше 0.24 эВ. Заметим, что при исследовании процессов лазерной десорбции молекул СО с поверхности никеля, как было показано в работе [2], экспериментальное и максвелловское распределения полностью совпадают. Можно предположить, что энергетическое распределение атомов кремния представляет собой наложение двух компонент. Первая компонента связана с термическим испарением атомов с поверхности и в основном определяет экспериментальное распределение при энергии частиц меньше 0.24 эВ. Вторая компонента образована атомами кремния с относительно большими энергиями, которые образовались в результате рекомбинации ионов в лазерной плазме.

Для того, чтобы проанализировать возможность объяснения наблюдаемых порогов эмиссии ионов и атомов кремния исходя из механизма поверхностной гермической ионизации, необходимо знать температуру разогрева поверхности при лазерном облучении. В связи с этим была измерена зависимость коэффициента отражения от плотности энергии излучения в импульсе. Известно, что при плавлении поверхности кремния происходит увеличение коэффициента отражения. Плотность энергии, при которой начинается его резкое увеличение и плавление кремния (т. е. поверхность достигает температуры 1690 К), составляет в нашем эксперименте 2.4 Дж/см^2 . Порог выхода нейтралей (4.6 Дж/см^2) примерно в два раза превышает энергию, соответствующую началу плавления. При таком превышении, как показано расчетами [3], температура поверхности может достигать величины 1900 К. Тогда, согласно представлениям поверхностной термоионизации, можно оценить отношение количества положительных ионов и нейтральных частиц, выходящих с поверхности: $N^+/N^0 = 1.2 \cdot 10^{-9}$ при $T=1900 \text{ К}$. Таким образом, по механизму термоионной эмиссии в рассматриваемом диапазоне плотностей энергии выход нейтральных частиц должен значительно преобладать над выходом ионов. На практике наблюдается обратная картина. Порог появления ионов ниже порога появления нейтральных атомов и интенсивность ионного сигнала больше.

Следовательно, выход ионов при этих плотностях энергии определяется фотоактивным действием света. Возможно, что реализуется следующий механизм фотостимулированного выхода ионов кремния. Атомы на поверхности находятся в нейтральном виде. При лазерном возбуждении создается высокая концентрация электронов

и дырок. Захват неравновесной дырки означает разрыв одной из связей поверхностного атома с кристаллом и образование положительного иона. Такой ион более слабо связан с кристаллом, чем поверхностный атом, и может уйти с поверхности.

Л и т е р а т у р а

- [1] Л а з н е в а Э.Ф., Т у р и е в А.М. - ПТЭ, 1984, № 4, с. 125-128.
- [2] Л а з н е в а Э.Ф., Ф е д о р о в И.Н. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 7, с. 393-397.
- [3] К h a i b u l l i n I.B., S h t y r k o v E.I., Z a r i p o v M.M., B a y a z i t o v R.M., A g a n o v R.V. - Rad. Eff., 1980, v. 49, N1-3, p. 33-38.

Ленинградский государственный
университет им. А.А. Жданова

Поступило в Редакцию
4 января 1988 г.