

К ВОЗМОЖНОСТИ ЭКЗОЭМИССИОННОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Р. Я. Акмене, Я. Л. Гавардин, Ю. Д. Дехтяр,
Г. Л. Сагалович, Е. А. Казакова, А. Я. Виноградов

Исследована фототермостимулированная экзоэлектронная эмиссия (ФТСЭ) из слоев аморфного кремния трех типов: термически напыленного при перпендикулярном $a\text{-Si}(\perp)$ и наклонном $a\text{-Si}(\angle)$ падении пучка пара на подложку, а также аморфного гидрированного кремния $a\text{-SiH}_x$ в интервале температур 273—723 К. Наличие развитой внутренней поверхности, а также собственных дефектов аморфной сетки кремния — оборванных связей — обуславливает сложность спектров ФТСЭ. Показано влияние фотоиндуцированных метастабильных состояний на спектры ФТСЭ в слоях аморфного гидрированного кремния.

Фототермостимулированная экзоэлектронная эмиссия (ФТСЭ) из монокристаллического кремния происходит по механизму фотоэлектронной эмиссии с локальных уровней термодинамически неравновесных вакансий, генерируемых в кристалле при его нагреве в результате диссоциации вакансионных комплексов [1]. Такими комплексами в монокристаллическом кремнии, ответственными за ФТСЭ, могут быть центры. Они дают пик в спектре ФТСЭ при 673 К и характеризуются сигналом ЭПР с $g=2.0055$ [2]. Аналогичная линия ЭПР в аморфном кремнии идентифицируется как оборванная связь аморфной сетки [3]. Можно предположить, что ФТСЭ спектроскопия может быть использована для диагностики дефектных состояний в аморфном кремнии.

Для исследования были выбраны слои аморфного кремния трех типов: аморфный кремний, термически напыленный из взвешенного состояния при перпендикулярном $a\text{-Si}(\perp)$ и наклонном $a\text{-Si}(\angle)$ падении пучка пара на подложку, а также аморфный гидрированный кремний $a\text{-SiH}_x$, получаемый плазмохимическим разложением моносилана в ВЧ разряде. Основные параметры осаждения слоев представлены в таблице.

Слой $a\text{-Si}(\perp)$ монолитны, но пронизаны сетью микропор, слои $a\text{-Si}(\angle)$ и $a\text{-SiH}_x$ характеризуются столбчатой микроструктурой с размером неоднородностей 50—500 Å. Поверхность столбов пассивирована

Основные параметры осаждения слоев аморфного кремния

Тип пленки	Номер образца	Температура осаждения, К	Скорость роста, Å/с	Толщина, мкм
$a\text{-Si}(\perp)$	1	573	30	1.0
	2	843	30	1.0
$a\text{-Si}(\angle)$	3	300	30	0.3
	4	373	30	0.3
$a\text{-SiH}_x$	5	408	0.6	1.0
	6	593	1.0	1.5

кислородом в случае $a\text{-Si} (\angle)$ или водородом в случае $a\text{-SiH}_x$ [4]. В исследуемых материалах присутствуют два основных типа дефектов аморфной сетки [4]. Во-первых, изолированные оборванные связи кремния во внутреннем объеме столбов в $a\text{-Si} (\angle)$ и $a\text{-SiH}_x$ или непрерывной матрицы в $a\text{-Si} (\perp)$. Во-вторых, оборванные связи на развитой внутренней поверхности микропор в $a\text{-Si} (\perp)$ и столбов в $a\text{-Si} (\angle)$ и в $a\text{-SiH}_x$.

ФТСЭ регистрировали в вакууме 10^{-4} Па при монотонном нагреве пленок со скоростью 0.2 К/с в интервале температур 293—723 К. Одновременно с нагревом слои подвергались фотостимуляции светом ксеноновой лампы мощностью 250 Вт, отфильтрованным с помощью стекла БС-12 ($h\nu_{\max} = 5$ эВ).

На рис. 1 продемонстрированы характерные спектры ФТСЭ из аморфного кремния разной природы, представляющие собой зависимости интенсивности эмиссии от температуры. Спектры ФТСЭ слоев аморфного кремния, полученных при низкой температуре подложки, а также $a\text{-SiH}_x$ (кривые 1, 3, 5) характеризуются возрастанием интенсивности эмиссии в области 473 и 673 К, тогда как в спектрах слоев, полученных при более высоких температурах осаждения, интенсивность ФТСЭ в исследованном интервале температур практически постоянна (кривые 2, 4). Кроме того, интенсивность ФТСЭ из $a\text{-Si} (\angle)$ в целом ниже, чем из $a\text{-Si} (\perp)$.

Возникновение двух ступеней в спектре ФТСЭ коррелирует с наличием двух типов оборванных связей в слоях аморфного кремния. Макси-

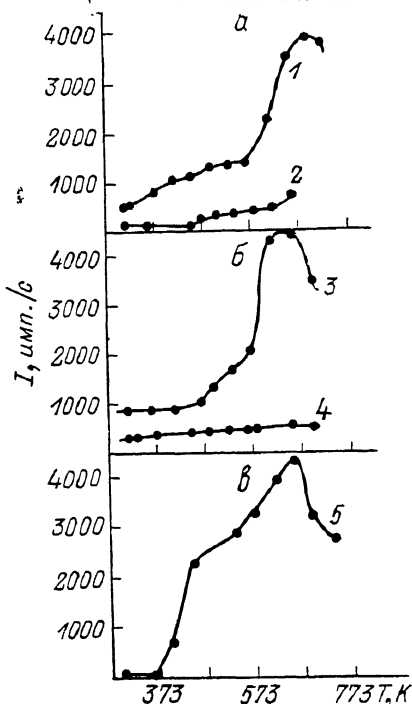


Рис. 1. Зависимость интенсивности ФТСЭ от температуры в слоях $a\text{-Si} (\perp)$ (а), $a\text{-Si} (\angle)$ (б), $a\text{-SiH}_x$ (в).

Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

мум интенсивности ФТСЭ при 673 К может быть связан с отжигом оборванных связей кремния во внутреннем объеме аморфной сетки кремния. Температура наблюдаемого максимума совпадает с таковой в процессе отжига VV -центров в кристаллическом кремнии [5].

Первая ступень интенсивности в спектрах ФТСЭ в области 373—473 К может быть связана с отжигом ненасыщенных связей кремния на развитой внутренней поверхности исследуемых слоев. Температура и интенсивность этого процесса должны сильно зависеть от особенностей микроструктуры пленок. В случае $a\text{-SiH}_x$ возникновение дефектов на внутренних поверхностях обусловлено процессом эффузии водорода при нагревании пленок выше 373 К [6]. Первая стадия этого процесса представляет собой удаление водорода с поверхностей элементов микроструктуры и образование обнаженной поверхности аморфной сетки кремния, т. е. поверхности, аналогичной по своей природе поверхности микропор и столбов в $a\text{-Si} (\perp)$ и $a\text{-Si} (\angle)$.

Особенностью $a\text{-SiH}_x$ является возникновение в этом материале индуцированных светом метастабильных состояний, так называемый эффект Стэблера—Вронского [7]. На рис. 2 представлены кривые интенсивности ФТСЭ из $a\text{-SiH}_x$ до и после облучения пленок светом лампы ДКСЛ-2000 мощностью 2 кВт, полученные в режиме изохронного отжига на установке [8]. Длительность регистрации эмиссии при каждой исследованной

температуре составляла 15 с. Это обеспечивало изменение интенсивности экзоэмиссии, не превышающее ошибки ее измерения. Исследование выполнено в более узком температурном интервале 293—573 К.

Сложная природа первой ступени ФТСЭ в интервале температур 373—473 К (кривая 1) требует дополнительных исследований. После освещения интенсивность ФТСЭ при комнатной температуре значительно возрастает (кривая 2). В результате нагрева дефектные состояния в области первой ФТСЭ отжигаются, и кривые ФТСЭ выше 473 К сближаются. Это может свидетельствовать о единой природе дефектов, индуцируемых светом в слоях α -SiH_x, и дефектов, ответственных за первую ступень в спектрах ФТСЭ.

В ряде современных трактовок эффекта Стэблера—Вронского предполагается, что генерация оборванных связей в результате освещения

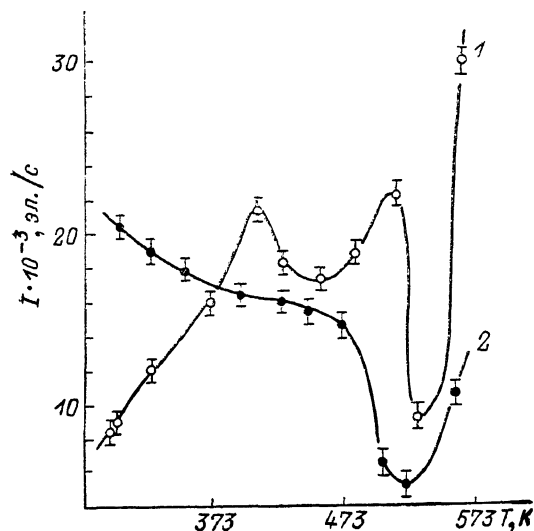


Рис. 2. Зависимость интенсивности ФТСЭ от температуры в слоях α -SiH_x (образец № 6) до (1) и после (2) облучения.

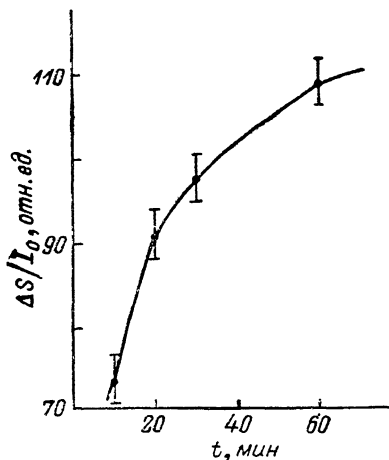


Рис. 3. Зависимость параметра $\Delta S/I_0$ от времени облучения пленки α -SiH_x светом.

обусловлена структурно-химическими перестройками с участием водорода [9], что в целом согласуется с нашими предположениями о поверхностной природе возникающих дефектов.

В [1] было показано, что отношение числа электронов, эмиттированных в процессе нагрева, $\Delta S = \Delta \int_{T_0}^T I(T) dT$ к интенсивности ФТСЭ при

комнатной температуре I_0 пропорционально концентрации дефектов, ответственных за процесс эмиссии, т. е. $\Delta S/I_0 \sim N_s$. На рис. 3 представлена зависимость фактора $\Delta S/I_0$ от времени освещения пленки, т. е. времени генерации светом ненасыщенных связей в α -SiH_x. Полученная нами форма кривой $\Delta S/I_0 = f(t)$ согласуется с зависимостью концентрации генерируемых светом оборванных связей от интенсивности падающего света и времени облучения, полученной методом ЭПР в [10], где показано, что $N_s \sim I^{1/2} t^{1/2}$.

Таким образом, выполненные исследования показывают возможность использования метода ФТСЭ спектроскопии для изучения дефектных состояний в слоях аморфного кремния.

Л и т е р а т у р а

- [1] Сагалович Г. Л., Дехтяр Ю. Д. // Поверхность. 1985. № 5. С. 65—72.
 [2] Герасименко Н. Н., Двуреченский А. В., Смирнов Л. С. // ФТП. 1971. Т. 5. № 9. С. 1700—1705.

- [3] Хамакава А. Ю. Аморфные полупроводники и приборы на их основе. М., 1986. С. 81—93.
- [4] Андреев А. А., Сидорова Т. А., Казакова Е. А. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. № 8. С. 1469—1475.
- [5] Алексеев А. Н., Быстров В. С., Дехтяр Ю. Д. и др. // ФТП. 1984. Т. 18. № 1. С. 169—170.
- [6] Ueda M., Chayahara A., Nakashita T., Imura T. // J. Appl. Phys. 1985. Pt. 1. V. 24. N 7. P. 795—799.
- [7] Staebler D. L., Wronsky C. R. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 6. P. 3262—3268.
- [8] Апелс А. Я. // Электронная техника, сер. 8. 1984. № 6. С. 19—21.
- [9] Stuke J. // Ann. Rev. Mater. Sci. 1985. V. 15. P. 79—102.
- [10] Stutzman M., Jackson W. B., Tsai C. C. // Phys. Rev. (B). 1985. V. 32. N 1. P. 23—47.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
7 июля 1988 г.
