

ФОТОСТИМУЛИРОВАННАЯ ДИФФУЗИЯ В КРЕМНИИ

Л.Н.Зюзь, А.Е.Кив, О.Р.Ниязова, Ф.Т.Умарова

В настоящее время известны экспериментальные результаты по фото-стимулированному отжигу радиационных дефектов [1–3]. В данной статье описан эффект значительного ускорения диффузии золота в кремнии при интенсивной подсветке.

Исследование проводилось методом меченых атомов. Перед напылением на образец золото облучалось в реакторе ВВР–С в течение 25 часов потоком $1,8 \cdot 10^{13}$ *н/см²·сек*. Образцы кремния *p*-типа (легирующая примесь – бор, удельное сопротивление 10 *ом·см*) вырезались таким образом, что плоскость поверхности была перпендикулярна направлению $\langle 111 \rangle$. Поверхность шлифовалась абразивами М–5, М–3, обрабатывалась полирующим травителем (СР–4) и промывалась четыреххлористым углеродом. Напыление на поверхность золотой пленки производилось в вакууме 10^{-5} *тор* при $T = 120^\circ\text{K}$. Толщина образцов была ~ 300 *мкм*, пленки $0,1 - 0,3$ *мкм*.

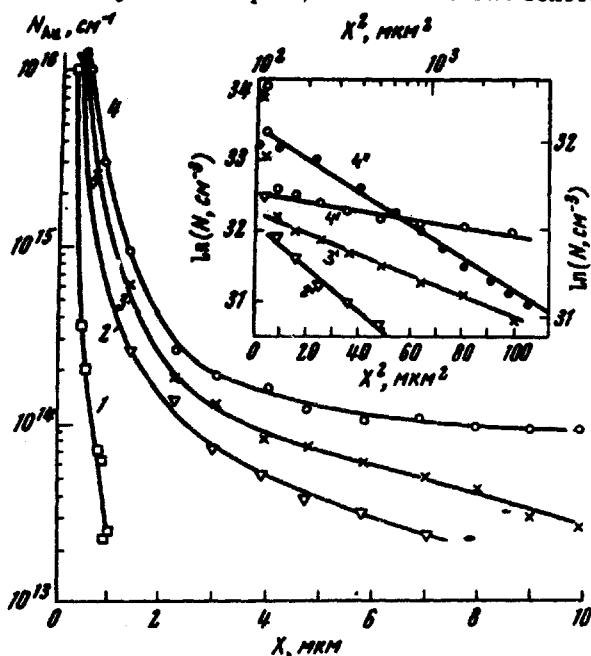
Образцы с напыленным радиоактивным золотом освещались лампой накаливания мощностью 340 *вт*. Поскольку освещение золотой пленки приводило бы к большим потерям светового потока в результате отражения [4], облучение проводилось с противоположной стороны. Во время облучения образцы охлаждались жидким азотом. Температура освещаемой поверхности не превышала 120°K .

Проводилось исследование двух серий образцов. Образцы первой серии с напыленным золотом освещались в течение 30 и 50 часов, образцы второй серии содержались при комнатной температуре без освещения.

После проведения диффузии производилось последовательное снятие слоев [5, 6] при помощи травителей $40 \text{HNO}_3 : 1 \text{HF}$ и СР–4. Толщина снятого слоя определялась путем взвешивания образцов до и после очередного сеанса травле-

ния. Снимались слои толщиной 1,5 – 2 мкм. Погрешность в определении толщины слоя была не более 0,5 мкм.

Концентрация золота в снятом слое определялась путем измерения остаточной активности образца после травления. В качестве эталона использовался изотоп Au – 198 весом $8 \cdot 10^{-11}$ г. Для предотвращения адсорбции золота в травителе поверхностью кремния образец после каждого сеанса травления тщательно промывался в царской водке. Одновременно для контроля проводилось послойное исследование необлученных образцов с напыленным золотом.



Профили распределения золота в кремнии: 1 – для контрольного образца, 2, 2' и 3, 3' – для образцов с введенным золотом при фотостимулированной диффузии (время экспозиции – 30 и 50 часов), 4, 4', 4'' – для образцов с введенным золотом при высокотемпературной диффузии ($T = 1070^\circ$), кривая 4'' относится к правой оси ординат и верхней оси абсцисс

В контрольных образцах золото не проникало в толщу кристаллов глубже, чем на 1 – 1,5 мкм. В облученных образцах за время экспозиции наблюдалось проникновение золота в кристаллы кремния до 10 мкм. Для сравнения были проведены также опыты по высокотемпературной диффузии золота в аналогичных образцах кремния при $T = 1070^\circ\text{K}$. Соответствующие результаты приведены на рисунке. На основании этих результатов для эффективного коэффициента фотостимулированной диффузии получено значение $\sim 10^{-12} \text{ см}^2/\text{сек}$, в случае высокотемпературной диффузии зависимость $\ln C$ от x^2 (см. рисунок) характеризуется изломом (аналогичным описанному в работе [7]), в результате чего на глубине до 10 мкм для коэффициента диффузии получается значение $\sim 10^{-10} \text{ см}^2/\text{сек}$, а в более глубоких слоях – $10^{-9} \text{ см}^2/\text{сек}$.

Упомянутые выше результаты по фотостимулированному отжигу радиационных дефектов в работах [1–3] объясняются перезарядкой диффундирующих центров. Однако, они могут быть объяснены и при помощи других моделей. Ускорение

миграции дефектов может быть связано с локальным выделением тепла при безызлучательных переходах, с изменением положения уровня Ферми [8].

В наших экспериментах впервые наблюдалась фотостимулированная гетеродиффузия. Гипотеза перезарядки в нашем случае вряд ли является приемлемой. Если атомы золота в кремнии в ионизованном состоянии, захват электрона не должен заметно влиять на скорость диффузии, поскольку время нахождения золота в нейтральном состоянии будет намного меньше времени диффузионного перескока. В случае обратного перехода нейтрального атома золота в положительно заряженный произойдет возрастание кулоновской части потенциального барьера. Оценки показывают, что в наших опытах концентрация фотоносителей меньше концентрации темновых носителей, в связи с чем заполнение уровней должно определяться "темновым" уровнем Ферми [9].

Учитывая величину энергии активации диффузии золота в кремнии, можно прийти к заключению, что для преодоления потенциального барьера одновременно с выделением тепла при безызлучательном переходе должна произойти значительная тепловая флуктуация, вероятность которой мала при температуре эксперимента.

По сравнению с перечисленными более вероятной представляется модель фотостимулированной диффузии, согласно которой возбуждение химических связей в окрестности седловой точки приводит к снижению потенциального барьера [10]. Представим перескок атома золота из равновесного междоузлия с координатами $(1/2, 1/2, 1/2)$ в соседнее с координатами $(3/4, 3/4, 3/4)$. Если смотреть на диффундирующий атом в седловой точке вдоль направления $\langle 111 \rangle$, можно заметить, что преодоление потенциального барьера связано с прохождением деформированного гексагонального кольца. Значительная часть энергии обусловлена необходимостью преодоления геометрического барьера — растяжения гексагонального кольца при прохождении атомом седловой точки. Локализация электронных возбуждений в окрестности седловой точки может привести к значительному расширению или разрыву гексагонального кольца [11], что означает, в частности, уменьшение геометрического барьера.

Описанные эффекты "холодной" фотостимулированной диффузии примесей в полупроводниках могут явиться основой для разработки новых методов легирования, которые найдут важные применения на практике.

Институт ядерной физики
Академии наук Узбекской ССР

Поступила в редакцию
15 июля 1970 г.

Литература

- [1] G.W. Mac Kay, E.E. Klontz. Rad. Effects in Semicond. (Proc. Santa Fe Conf., 1967), N. Y., 1968.
- [2] J. Zizine, G. Arimura (Santa Fe Conf., 1967), N. Y., 1968.
- [3] H. J. Stein. J. Appl. Phys., 37, 9, 3382, 1966.
- [4] М.М. Гуревич. Введение в фотометрию, Л., Изд. Энергия 1968, стр. 83.
- [5] А.И. Койфман, О.П. Ниязова. ФТП, 3, 9, 1405, 1969.
- [6] K. Gamo, A. Doi, K. Masuda, S. Namba. Japan. J. Appl. Phys., 9, 333, 1970.
- [7] М.К. Бахадырханов, Б.И. Болтакс. ФТП, 4, 5, 873, 1970.

- [8] Б.И.Болтакс, Г.С.Куликов, Р.Ш.Малжович. ФТТ, 2, 2, 181, 1960.
- [9] А.Роуз. Основы теории фотопроводимости, М., Изд. Мир, 1966.
- [10] А.Е.Кив, Ф.Т.Умарова. ФТП, 4, 3, 1970.
- [11] А.Е.Кив, Ф.Т.Умарова, З.И.Искандерова. ФТП, 4, 9, 1970.
-