

УДК 621.38:537.534.9

М.В.Хуторщиков (6 курс, каф. ПФОТТ),  
А.И.Титов, д.ф.-м.н., проф., Л.М.Никулина, к.ф.-м.н., ст.н.с.

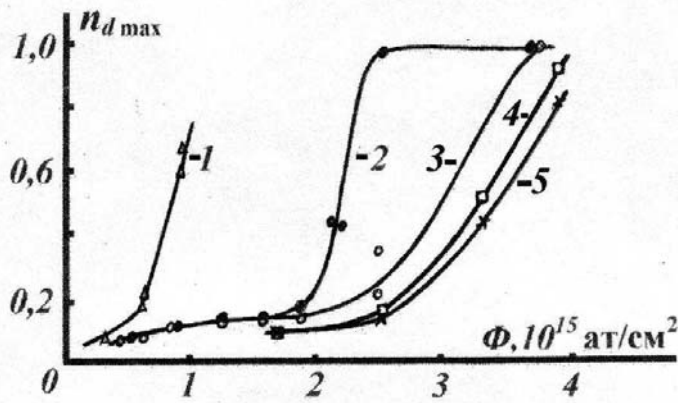
## НАКОПЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

ABSTRACT: Damage accumulation during room temperature  $N_1^+$  and  $N_2^+$  ion bombardment of Si for different dose of ion has been studied. Resulting depth defect distributions were investigated using inelastic electron reflectance anisotropy technique. A small molecular effect in damage accumulation was obtained and discussed.

В настоящее время ионная имплантация является одним из основных и наиболее перспективных методов контролируемого введения примесей в полупроводниковые материалы. Ионное легирование полупроводников неразрывно связано с процессами образования и накопления в них радиационных повреждений. Поскольку данные процессы сильно влияют на электрические свойства получаемых структур, чрезвычайно важным оказывается понимание явлений, сопровождающих введение в полупроводники ускоренных ионов. Одно из них – молекулярный эффект (МЭ). Суть его состоит в том, что эффективность какого-либо явления (например, распыления, ионного перемешивания или накопления радиационных повреждений) в расчёте на один упавший атом отличается при использовании в эквивалентных условиях атомарных и молекулярных ионов.

Молекулярный эффект при накоплении радиационных повреждений в полупроводниках под действием тяжёлых ионов известен давно [1] и удовлетворительно объясняется в рамках модели нелинейных энергетических пиков – пиков смещений или тепловых. Согласно этой модели, если концентрация смещений в пике смещений или средняя энергия, переданная атомам в тепловом пике, превышает пороговое значение, то процессы в них становятся нелинейными. В результате количество устойчивых нарушений, оставшихся после стабилизации, начинает нелинейно зависеть от энергии, переданной атомам вещества в упругих столкновениях. Естественно, что тогда перекрытие нелинейных каскадов, создаваемых компонентами молекулярного иона, должно приводить к МЭ. Для тяжёлых ионов с энергиями  $\sim 10$  кэВ условия нелинейности энергетических пиков выполняется и наличие МЭ вполне естественно.

Для ионов малой массы средние индивидуальные каскады в целом не являются нелинейными, но условия нелинейности могут выполняться для отдельных субкаскадов, на которые разбивается каждый индивидуальный. Однако вероятность перекрытия таких субкаскадов, создаваемых компонентами молекулярного иона, должна убывать по мере продвижения этих компонентов вглубь вещества из-за рассеяния на атомах мишени. Казалось бы, МЭ в этом случае, если и может наблюдаться, то только на малых глубинах. Действительно, авторы работы [2] обнаружили МЭ при имплантации ионов  $N_1^+$  и  $N_2^+$  в Si у его поверхности. Однако существует большое количество работ, авторы которых пытались наблюдать МЭ и в области объёмного максимума распределения дефектов по глубине; имеющиеся экспериментальные данные противоречивы (см. в [2]). Это можно объяснить некорректным проведением эксперимента: эквивалентность условий, наряду с равенством энергий и доз в расчёте на атом, в случае лёгких ионов дополнительно требует и соответствия плотностей потока. А авторы многих работ это не учитывали. Указанные условия строго выполнялись в работе [3]. В ней был обнаружен сильный МЭ для объёмного максимума распределения дефектов.



Зависимость  $n_{dmax}(\Phi)$  для облучения Si при  $T = 300K$  ионами  $N_2^+$  (1, 2, 4) и  $N_1^+$ .

Кривые 1–3 – данные работы [3], 4, 5 – данные, полученные в настоящей работе.

Энергии ионов, кэВ/атом: 1–3 – 30; 4, 5 – 40.

Плотность потоков ионов,  $10^{11}$ ·атом/см<sup>2</sup>·с:

1 – 62,4; 2, 3 – 19,4; 4, 5 – 2,8.

0,15 для плотности потока, равной  $19,4 \cdot 10^{11}$  атом·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, накопление дефектов для атомарных и молекулярных ионов существенно различно: дозы аморфизации составляют  $3,75 \cdot 10^{15}$  и  $1,25 \cdot 10^{15}$  атом·см<sup>-2</sup> соответственно. При этом скорость введения структурных нарушений:  $dn_{dmax}/d\Phi$  на этом участке дозовой зависимости отличается более чем в три раза для различных типов ионов (см. кривые 2 и 3)

Обнаруженный сильный МЭ не может быть объяснён в рамках описанных выше представлений. Причины данного эффекта не удалось выяснить и авторам работы [3]. Очевидно, что для понимания его природы необходимы дополнительные исследования.

Целью настоящей работы было выяснение механизма МЭ для лёгких ионов в Si и дополнение имеющихся данных работы [3]. Для этого предполагалось исследовать влияние на МЭ величины плотности потока ионов. В настоящих экспериментах облучению при комнатной температуре подвергались пластины Si(111) фирмы Wacker легированные бором с  $\rho \approx 1$  Ом·см. Пучок ионов  $N_1^+$  или  $N_2^+$  с  $E = 40$  кэВ·атом<sup>-1</sup> направлялся под углом  $11,5^\circ$  относительно направления  $\langle 111 \rangle$  в плоскости  $\{128\}$  для подавления осевого и плоскостного каналирования. Плотность потока ионов выбиралась таким образом, что её величина в атомах на единицу поверхности совпадала для атомарных и молекулярных ионов азота. Измерение распределений концентрации дефектов по глубине осуществлялось методом анизотропии неупругого отражения электронов при послойном удалении калиброванных по толщине слоёв Si (анодное окисление и последующее растворение окисла в HF).

На данный момент получены экспериментальные результаты для малой плотности потока, равной  $2,8 \cdot 10^{11}$  атом·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Анализ полученных распределений концентрации дефектов по глубине показывает, что, как и в работе [2], при данных условиях имплантации наблюдается отчётливо выраженный МЭ у поверхности кремния, природа которого может быть связана с перекрытием субкаскадов смещений на начальном участке траекторий атомов, составляющих ион  $N_2^+$ . В области объёмного максимума дефектов, который располагается на глубине  $\approx 80$  нм, что близко к положению максимума упругих потерь энергии ионов азота, МЭ выражен очень слабо. Это хорошо видно из рисунка, где кривыми 4 и 5 показаны зависимости  $n_{dmax}(\Phi)$  для ионов  $N_1^+$  и  $N_2^+$ , соответственно. Видно, что различие в повреждении Si атомарными и молекулярными ионами только  $\sim 15\%$ .

На рисунке кривыми 1, 2 и 3 представлена полученная в [3] зависимость относительной концентрации дефектов в максимуме их распределения по глубине ( $n_{dmax}$ ) от дозы ( $\Phi$ ) атомарных и молекулярных ионов азота.

Видно, что при малых уровнях повреждения, атомарные и молекулярные ионы создают одинаковое количество дефектов в расчёте на один упавший атом. Однако, при  $n_{dmax} >$

Значения  $dn_{dmax}/d\Phi$  для полученных нами зависимостей практически совпадают со скоростью введения дефектов для атомарных ионов в [3].

Таким образом, полученные результаты показывают, что уменьшение плотности ионного тока приводит к подавлению МЭ для объёмного максимума дефектов. Подобный эффект никогда не наблюдался ранее и лежит вне рамок современных представлений о природе МЭ. Мы надеемся, что проведение исследований для широкого диапазона плотностей потока позволит получить ключ к разрешению данной проблемы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. D. A. Thompson, R. S. Walker // Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. 132, 1976, P. 281
2. A. I. Titov, S. O. Kucheyev // Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B 149, 1999, P. 129
3. И. А. Аброян, Л. М. Никулина // ФТП, 1997, Т. 31, № 10