

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕНИЯ КРЕМНИЯ
ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Х. Р. Каздаев, В. В. Краснопевцев, А. Н. Кудышев,
С. И. Тамулевичюс

УДК 621.315.592:539.21.082.79

Для исследования кинетики разупорядочения Si при ионном внедрении используется метод проводимости, индуцированной быстрыми электронами. Показано, что по зависимости радиационной проводимости от дозы ионов можно определить критическую дозу аморфизации Si ($4 \cdot 10^{14}$ см⁻² для ионов Ar с энергией 30 кэВ при комнатной температуре).

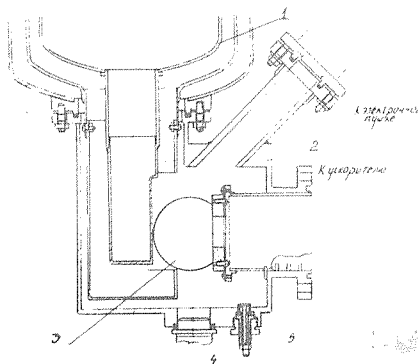
В результате возбуждения носителей заряда быстрыми электронами или другими частицами в полупроводнике возникает дополнительная электропроводность, которую, в отличие от фотопроводимости, называют радиационной проводимостью /1,2/. Если время жизни неосновных носителей определяется процессами рекомбинации в объеме полупроводника, то величина радиационной проводимости будет зависеть от различных параметров материала, и, в частности, от природы и концентрации дефектов решетки (центров рекомбинации).

По сравнению с фотовозбуждением, возбуждение носителей электронами дает возможность путем изменения энергии частиц управлять в широких пределах глубиной области генерации электронно-дырочных пар, что является особенно важным при исследовании эффектов ионной имплантации. Данные о радиационной проводимости, полученные *in situ*, непосредственно во время ионного внедрения, позволяют судить о механизмах образования и накопления радиационных нарушений и, в конечном счете, о кинетике

разупорядочения кристаллической структуры (вплоть до аморфизации) в зависимости от температуры мишени, энергии и массы внедренных ионов и т.п. В настоящем сообщении описан метод радиационной проводимости, индуцированной быстрыми электронами, развитый для исследования кинетики образования нарушений в кремнии в процессе ионной имплантации при различных температурах подложки.

Зависимость радиационной проводимости кремния р-типа (удельное сопротивление $3000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) от дозы внедренных ионов ^{40}Ar исследовалась при комнатной температуре. Монокристаллические образцы размером $4 \times 9 \times 1 \text{ мм}^3$ с основной поверхностью, ориентированной по плоскости (111), перед измерениями подвергались обработке в полирующем травителе $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$ (1:16:1) в течение 30–40 мин [3]. В качестве контактов использовались напыленные слои Au.

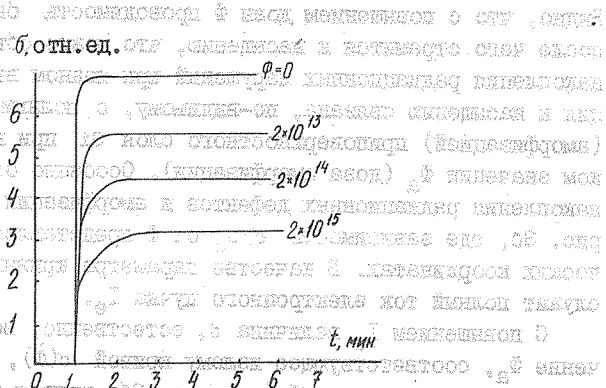
Возбуждение неравновесных электронов и дырок в тонком слое Si осуществлялось электронным пучком от промышленной электронной пушки типа ЭОСС-2. В постоянном режиме электронная пушка позволяет получать токи до 200 мА в пучке при энергии электронов до 25 кэВ. Для модуляции электронного пучка по амплитуде использовался звуковой генератор, включенный в цепь смещения сетки через повышающий трансформатор.



Р и с. 1. Приемник ионов: 1 – криостат КР-15, 2 – корпус, 3 – окно, 4, 5 – выводы для электрических измерений и термопары, 6 – устройство для измерения тока ионов, 7, 8 – фланцы

Внедрение ионов Ar с энергией 30 кэВ проводилось при плотности тока ионного пучка 0,4-1,0 мкА/см², когда влиянием ионного тока на процессы образования дефектов и аморфизацией кремний можно пренебречь [4]. Точность измерения дозы ионов составляла 0,01 мкКл/см² или $6,25 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Для исследования радиационной проводимости при внедрении ионов в подложку с пониженной температурой использовался специальный приемник ионов (рис. 1), сконструированный на основе гелиевого криостата КР-15/5/. Приемник ионов включает в себя корпус с оптическими окнами (3) и с вводами (4) для электрических измерений и термометры (5), гелиевый криостат (1), устройство для контроля за ионным пучком (6), которое состоит из электрических зондов и четырех цилиндров Фарадея. С помощью двух фланцев приемник соединен с ускорителем ионов (7) и с электронной пушкой (8). Температуру мишени в приемнике можно изменять от температуры, близкой к температуре жидкого гелия, до 600 К.



Р и с. 2. Зависимость радиационной проводимости σ от времени при различных дозах внедренных ионов Ar; энергия возбудящих электронов 5 кэВ, ток электронного пучка 0,14 мкА

Стационарную концентрацию неравновесных электронно-дырочных пар, генерируемых электронами, можно оценить с помощью соотношения $n \approx (E_e t_e) / (2,5 E_g e R_m)$, где E_e — энергия электронов,

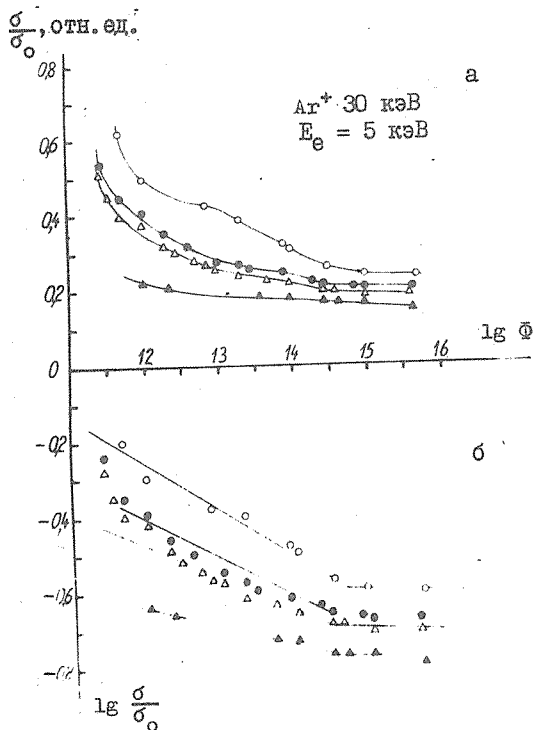
максимальный пробег электронов в полупроводнике $R_m = x_m + 2a$, x_m - средний пробег электронов, a - глубина, на которой концентрация неравновесных носителей уменьшается в два раза, j_e - плотность тока электронного пучка, τ - время жизни неравновесных носителей заряда, E_g - ширина запрещенной зоны полупроводника, e - заряд электрона. Если $\tau_n \ll \tau_e = 10^{-8}$ с, $E_e = 5$ кэВ и $j_e = 0,04$ мкА/см², то количество неравновесных электронов, создаваемых в кремнии, составляет около $2 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Эта величина гораздо меньше концентрации собственных носителей в Si при комнатной температуре $4 \cdot 10^{12}$ см⁻³.

На рис. 2 показана зависимость радиационной проводимости $\sigma = \mu n e$ от времени при разных дозах имплантированных ионов Ar (начало бомбардировки в момент $t = 1$ мин, энергия электронов 5 кэВ, ток электронного пучка 0,14 мкА). На рис. 3а приведена зависимость σ/σ_0 (σ_0 - радиационная проводимость в исходном кристалле) от дозы внедренных ионов при энергии возбуждающих электронов 5 кэВ и полном токе электронного пучка 0,22 мкА. Видно, что с повышением дозы Φ проводимость быстро спадает, после чего стремится к насыщению, что можно объяснить процессом накопления радиационных нарушений при ионном внедрении. Тенденция к насыщению связана, по-видимому, с полным разупорядочением (аморфизацией) приповерхностного слоя Si при некотором критическом значении Φ_a (доза аморфизации). Особенно отчетливо области накопления радиационных дефектов и аморфизации проявляются на рис. 3б, где зависимость σ/σ_0 от Φ представлена в логарифмических координатах. В качестве параметра кривых $\lg \sigma/\sigma_0$ от $\lg \Phi$ служит полный ток электронного пучка I_e .

С повышением I_e величина σ , естественно, возрастает, а значение Φ_a , соответствующее излому кривой $\sigma(\Phi)$, смещается в сторону более высоких доз Φ (см. рис. 3б, кривая для $I_e = 0,22$ мкА). Последнее обстоятельство можно объяснить частичным восстановлением разупорядоченной структуры под действием электронной бомбардировки (электронный отжиг).

Значение дозы аморфизации Si в случае внедрения ионов Ar с энергией 30 кэВ, найденное по излому кривых $\sigma(\Phi)$ (рис. 3б), составляет $4 \cdot 10^{14}$ см⁻². Электронная дифракция показывает, что структура Si по мере увеличения дозы Φ меняется от структуры совершенного монокристалла до полностью аморфизованного материа-

ла (выше $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$).



Р и с. 3. Зависимость радиационной проводимости σ/σ_0 в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах (при различном токе пучка возбуждающих электронов) от дозы Φ внедренных ионов:

○ - 0,22; ● - 0,14; △ - 0,12; ▲ - 0,05, мкА

Чувствительность радиационной проводимости к эффекту накопления радиационных нарушений и, в конечном счете, к аморфизации материала зависит от энергии возбуждающих электронов. Максимальная чувствительность наблюдается при энергиях, когда средний пробег электронов совпадает или меньше характерной глубины залегания внедренных ионов (смещенных атомов подложки). При более

Сравнение максимальных пробегов электронов и ионов.

Ионы	$R_p,$ МЭМ	$\Delta R_p,$ МЭМ	$R_p + 2AR_p$ МЭМ	$\frac{R_p + 2AR_p}{R_{II}}$					
				Энергия электронов, кэВ					
				1	2	3	4	5	6
He	0,3002	0,0856	0,4714	18,31	9,07	6,02	4,71	3,93	2,52
C	0,0980	0,0370	0,172	6,62	3,31	2,29	1,72	1,43	0,92
N	0,0828	0,0316	0,146	5,62	2,81	1,92	1,46	1,21	0,76
Ne	0,0562	0,0213	0,0986	3,79	1,896	1,30	0,986	0,82	0,53
Si	0,0400	0,0143	0,0686	2,64	1,32	0,9	0,686	0,57	0,37
Ar	0,0319	0,0101	0,0521	2,00	1,00	0,69	0,521	0,43	0,28
Kr	0,0209	0,0045	0,0239	1,15	0,575	0,333	0,299	0,25	0,16

высоких энергиях электронов радиационная проводимость определяется, в основном, генерацией и рекомбинацией неравновесных носителей заряда в слое полупроводника, расположенном за максимумом распределения внедренных ионов.

В табл. I приведены отношения максимальных пробегов электронов с энергией от 1 до 6 кэВ /7/ к максимальным пробегам внедренных ионов с энергией 30 кэВ в кремнии /8/. R_p и ΔR_p — средний проецированный пробег ионов и его нормальное отклонение, $R_p + 2\Delta R_p$ — расстояние от поверхности образца, где концентрации внедренных ионов на порядок ниже максимальной. Из таблицы вытекает, что для исследования кинетики накопления радиационных нарушений (аморфизации) метод радиационной проводимости удобнее всего использовать в том случае, когда отношение $(R_p + 2\Delta R_p)/R_m \approx 1$. Следует заметить, что для небольших пробегов ионов существенный вклад в радиационную проводимость должна давать поверхностная рекомбинация носителей заряда.

Таким образом, метод радиационной проводимости, индуцированной быстрыми электронами, позволяет: а) проследить за кинетикой накопления радиационных нарушений (аморфизации) при ионной имплантации; б) определить критическую дозу аморфизации при различных условиях ионного внедрения; в) судить о скорости образования радиационных дефектов на различной глубине.

Авторы признательны И. П. Акимченко, В. С. Вавилову и Г. Н. Галкину за неоднократное плодотворное обсуждение экспериментальных данных, А. А. Громадину за помощь в наладке измерительной аппаратуры, А. Е. Городецкому за электронно-дифракционные исследования структуры ионно-имплантированных слоев кремния.

Поступила в редакцию
25 марта 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. С. М. Рывкин, Б. М. Коноваленко, Ю. С. Сметанникова, ЖТФ, 24, вып. 6, 961 (1954).
2. И. А. Аброян, ФТТ, 4, вып. 10, 2719 (1962).
3. А. И. Курносоев. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. "Высшая школа", М., 1975 г.

4. Вопросы радиационной технологии полупроводников, под ред. проф. Л. С. Смирнова, "Наука", Новосибирск, 1980 г.
5. E. N. Lotkova, A. B. Fradkov, Cryogenic Engineering News, N 6 (1961).
6. В. С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники, Физматгиз, М., 1963 г.
7. В. В. Макаров, ФТП, 9, вып. I, 35 (1975).
8. А. Ф. Буренков и др., Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей, Издательство БГУ им. В. И. Ленина, Минск, 1980 г.