

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ПРОФИЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИТИЯ,
ИМПЛАНТИРОВАННОГО В КРЕМНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДОЗАХ

Е. М. Баядилов, Л. Н. Кацауров ^{*}, В. В. Краснопевцев,
К. Нургалиев ^{*}

УДК 621.315.592

Изменение распределения по глубине имплантированных ионов Li в кремнии при последующей термообработке исследуется с помощью резонансной реакции ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}^*$. Интенсивная миграция Li из имплантированного слоя (энергия активации $0,32 \pm 0,01$ эВ) наблюдается выше 300°C .

Для эффективного использования имплантированных полупроводников необходимо знать распределение внедренной примеси по глубине подложки и изменение этого распределения при термообработке. В настоящей работе для исследования профиля концентрации Li , имплантированного в Si , в зависимости от последующего изохронного отжига при температурах от 100 до 700°C использовалась резонансная реакция захвата протонов ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}^*$ /1,2/ (энергия протонов в резонансе и его полуширина равны, соответственно, $441,2$ и 12 кэВ, эффективное поперечное сечение в резонансе $7,2 \cdot 10^{-27}$ см^2 /3/). Внедрение ионов Li с энергией 37 кэВ в Si n -типа ($\rho = 100 - 250$ Ом·см) производилось при комнатной температуре и дозах до $3,3 \cdot 10^{16}$ см^{-2} . Время отжига в вакууме составляло 30 мин при каждой температуре. Часть образцов до термообработки была подвергнута импульсному лазерному облучению ($\lambda = 0,694$ мкм, $\tau_{\text{имп}} = 60$ нс, $\Phi_{\text{имп}} = 6,4$ МВт· см^{-2}). Измерения выхода ядерной реакции велись со статистической ошибкой не более 3% в максимуме и до 5% на высоте полуширины. Калибровка ускорителя ЭГ-2 по энергии проводилась по реакции ${}^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma){}^{16}\text{O}$ /4/. Телесный угол, внутри которого испуска-

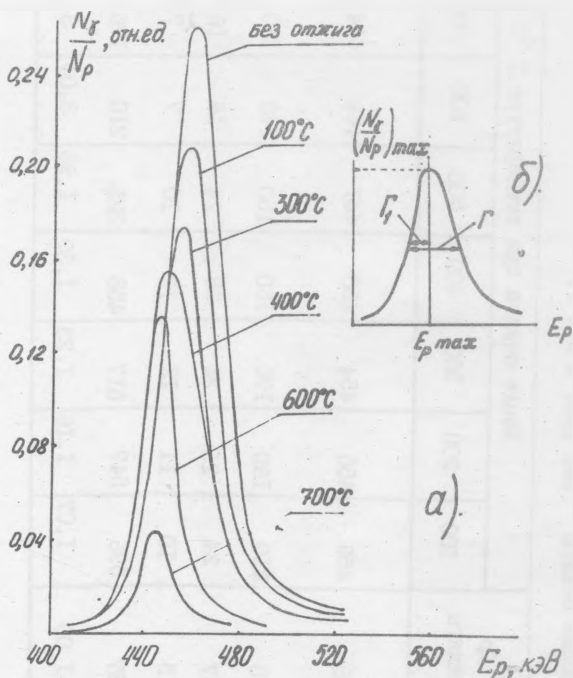
^{*} Институт ядерных исследований АН СССР.

Таблица I

Параметры, характеризующие кривые выхода реакции ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}^*$ в кремнии
до и после отжига (см. рис. I а и б)

Параметры кривых	До отжига	После отжига при температуре T °C							
		100	200	300	400	500	600	650	700
Положение максимума $E_p \text{ max}$, кэВ	459	456	456	454	450	447	444	444	444
Высота максимума $(N_\gamma/N_p)_{\text{max}}$, произв.ед.	270	210	180	170	160	150	140	120	5
Полуширина Γ , кэВ	27	24	25	24	28	24	16	16	16
Полуширина Γ_I , кэВ	13	10	11	12	12	10	7	7	7
Площадь S , произв. ед.	637	596	547	517	458	325	210	176	66
Отношение площадей S_0/S	1,00	1,07	1,16	1,23	1,39	1,96	3,04	3,62	9,58

емые мишенью γ -кванты регистрировались кристаллом $\text{NaJ}(\text{Tl})$, сохранялся неизменным с точностью 1-3%. Угловое распределение излучения в реакции ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}^*$ принималось сферическим.



Р и с. 1. а) Кривые выхода реакции ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}^*$ в кремнии, имплантированном ионами Li при дозе $3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, до и после отжига при температуре T до 700°C ; б) Схематическая кривая выхода ядерной реакции

На рис. 1а приведены кривые относительного выхода реакции $\dot{\gamma} = N_\gamma/N_p$ в зависимости от энергии E_p падающих протонов (N_p - количество протонов, падающих на мишень, N_γ - число γ -квантов, зарегистрированных счетчиком). Эти кривые получены до и после отжига при температуре T до 700°C . Доза ионов составляла $3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При увеличении T высота максимума $\dot{\gamma}$ и его полуширина

уменьшаются, а сам максимум сдвигается в сторону более низких значений E_p . При этом левая половина максимума сужается сильнее, чем правая (см. рис. 1б и табл. I). Существенное сужение кривых происходит начиная с 325 °С. Это означает, что с повышением T количество атомов Li в слое, зондируемом протонным пучком, и их концентрация уменьшаются, причем максимум концентрации несколько смещается к поверхности образца.

Площадь под этими кривыми представляет собой двойной интеграл

$$S = \int_{E_1}^{E_2} dE \int_0^E n \frac{\sigma}{B} dE,$$

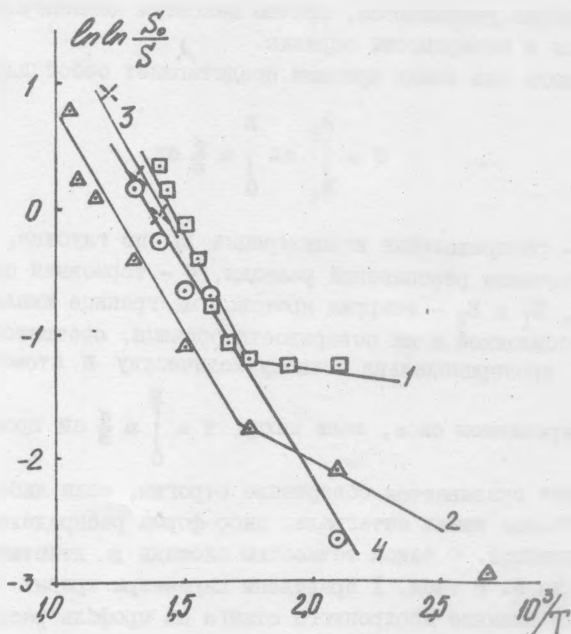
где n - распределение концентрации Li по глубине, σ - эффективное сечение резонансной реакции, B - тормозная способность кремния, E_1 и E_2 - энергия протонов на границе имплантированного слоя с подложкой и на поверхности образца, соответственно. Площадь S пропорциональна полному количеству N атомов Li в

имплантированном слое, если выход $Y = \int_0^E n \frac{\sigma}{B} dE$ пропорционален N .

Последнее оказывается совершенно строгим, если либо σ/B можно вынести из-под знака интеграла, либо форма распределения n остается неизменной. С такой точностью площадь S действительно пропорциональна N . В табл. I приведены параметры кривых $Y(E_p)$, характеризующие влияние изохронного отжига на профиль распределения внедренного Li . Здесь же указаны площади кривых S .

Таким образом, зависимость кривых выхода от температуры указывает на миграцию Li в результате термического отжига. Энергию активации этого процесса можно оценить по изменению площади S в зависимости от T . Если миграция Li из имплантированного слоя происходит с энергией активации U , то для величины S_t в момент времени t в процессе отжига при температуре T можно написать $S = S_0 \exp(-t/\tau)$ (S_0 - площадь исходной кривой, пропорциональная количеству N до отжига, а время между двумя соседними актами перескока атома $\tau = \tau_0 \exp(U/kT)$, где τ_0 - период колебаний атома Li). На рис. 2 представлена зависимость $\ln S_0/S$ от $1/T$ для четырех различных образцов. Прямые 1 и 2 на рис. 2 имеют излом при $T =$

= 570 К, а зависимость $S_0/S(T)$ при более низких T оказывается слабой. Величина U , найденная по наклону экспериментальных кривых в области температур выше 570 К ($1/T = 1,75 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$), равна $0,32 \pm 0,01$ эВ.



Р и с. 2. Зависимость величины $\ln \ln S_0/S$ от $1/T$ для кремния, имплантированного ионами I_1 при дозах: $1,5 \cdot 10^{16}$ (1), $3,3 \cdot 10^{16}$ (2) и $3 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ (3 и 4). Кривые 1, 3 и 4 соответствуют образцам, облученным перед термообработкой лазером соответственно при $W = 32,22$ и 25 МВт·см $^{-2}$

При указанных дозах ионов I_1 приповерхностный слой S_1 оказывается сильно нарушенным и частично аморфизированным, так что миграция внедренных атомов при низких температурах происходит в неупорядоченной структуре. Поэтому следует ожидать, что диффузия лития в таком материале будет осуществляться с другой энергией активации, нежели в кристаллическом кремнии ($U = 0,8$ эВ

/5/). Вместе с тем, при дозах ионов $3,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ концентрация Li в слое толщиной около 0,2 мкм, равной удвоенной проекции нормального отклонения пробегов, оказывается более $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ /6/, что заведомо превышает предел растворимости Li в Si ($\sim 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при 1200°C /5/). Вследствие этого атомы Li присутствуют в слое в виде ассоциаций друг с другом (металлическая фаза) либо образуют с атомами матрицы молекулярные комплексы типа $\text{Li}_{4n}\text{Si}_n$, $\text{Li}_{2n}\text{Si}_n$ /5/. Можно думать, что энергия диссоциации подобных образований ниже энергии активации в случае миграции Li в нарушенном Si . До температуры около 300°C , соответствующей излому кривых 1 и 2 рис. 2, миграция Li почти не наблюдается, так как практически весь имплантированный слой кремния остается сильно разупорядоченным. Выше 300°C происходит частичное восстановление структуры более глубокой части слоя (энергия рекристаллизации аморфной фазы 1,9 - 2,8 эВ /7/), что и инициирует движение атомов Li в глубь кристалла. Можно думать, что после облучения имплантированного слоя лазером, которое приводит к отжигу радиационных нарушений и рекристаллизации аморфного Si /8/, интенсивная миграция Li будет происходить до 300°C . Кривые 1 и 4, рис. 2, соответствуют лазерному облучению (мощность 32 и 25 $\text{Мвт} \cdot \text{см}^{-2}$, соответственно). Восстановление разупорядоченного материала, прилегающего к подложке, в одном случае действительно наблюдается (кривая 4), тогда как в другом заметные изменения структуры, по-видимому, отсутствуют (ср. кривые 1 и 2).

Авторы благодарят Х. Р. Каздаева за опыт по ионному внедрению лития в образцы, а также Е. А. Боброву за облучение образцов импульсами лазера.

Поступила в редакцию
17 апреля 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. Б. В. Затолокин, Л. Н. Кацауров, В. В. Краснопенцев, Ю. В. Милютин, К. Х. Нусупов, Физические основы ионно-лучевого легирования. Материалы научной конференции (1971 г., Горький), Горький, 1972 г., стр. 47.

2. Е. М. Баядилов, В. С. Вавилов, Л. Н. Кацауров, В. В. Краснопецев, Ю. В. Милотин, К. Х. Нусупов, ФТП, 7, 1833 (1973).
3. T. W. Bonner, J. E. Evans, Phys Rev., 72, 666 (1948).
4. J. B. Marion, Rev. Mod. Phys., 33, 139 (1961).
5. Б. И. Болтакс, Диффузия в полупроводниках, ГИФМЛ, М., 1961 г.
6. J. F. Gibbons, Proc. IEEE, 56, 295 (1968).
7. L. Cserregi, E. F. Kennedy, T. J. Gallagher, J. W. Mayer, T. W. Sigmon, J. Appl. Phys., 48, 4234 (1977).
8. Е. И. Штырков, И. Б. Хайбуллин, М. М. Зарипов, М. Ф. Галляудинов, Р. М. Баязитов, ФТП, 9, 2000 (1975).