

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ АТОМОВ ЛИТИЯ В АЛМАЗЕ

Е. А. Конодова. В. Ф. Сергиенко. С. Д. Ткаченко,
В. А. Дравин. А. В. Спицын

УДК 621.3.15.592

Методом масс-спектропии вторичных ионов исследованы профили распределения атомов лития, имплантированных в алмаз при энергии ионов, 30 - 450 кэВ. Показано, что отклонение величины среднего проецированного пробега ионов лития от рассчитанного по теории Линдхарда, Шарфа, Шютта начинается при скоростях ионов, близких к скоростям орбитальных электронов мишени.

Изучение пробегов ионов лития в алмазе представляет интерес с двух точек зрения. Во-первых, внедрение ионов лития в алмаз приводит к образованию полупроводникового слоя *n*-типа, что имеет значение для использования алмаза в полупроводниковой электронике. Во-вторых, поскольку в данном случае мы имеем дело с внедрением легких ионов, относительно больших энергий в мишень из легких атомов, представляется возможность выяснить границу применимости теории Линдхарда, Шарфа, Шютта (ЛШШ) /1/.

В табл. I даны характерные энергии для ионов лития, внедряемых в алмаз.

Таблица I

	$S_n = S_e$	$E_1 = MV_1^2/2$	E_F	E_a	E_0
Энергия кэВ.	4	760	206	3,1	45
Ограничение на энергию иона по теории ЛШШ	-	$E < E_1$	$E < E_F$	$E \geq E_a$	$E \leq E_0$

Во втором столбце приведена энергия ионов, при которой ядерная тормозная способность S_n равна электронной S_e . Исследование пробегов нами проводилось в диапазоне энергий 30 - 450 кэВ. Из табл. I следует, что в данном случае основной вклад в торможение вносят потери на возбуждение электронов. В последующих столбцах табл. I приведены следующие величины: v_1 - скорость, при которой эффективный заряд иона лития равен его атомному номеру, соответственно M_I - масса иона, E_F - энергия иона лития, при которой его скорость равна скорости электрона, находящегося на уровне Ферми в алмазе. При энергии ионов лития свыше E_F соотношение $S_e \propto E^{1/2} / I$ может не выполняться. Поскольку при некоторой энергии зависимость $S_e(E)$ имеет максимум, можно думать, что рост S_e с энергией замедляется и экспериментальные пробеги будут превышать расчетные.

Значения энергии E_a и E_0 являются граничными для расчетов, приведенных в /2/ и определяются соотношениями:

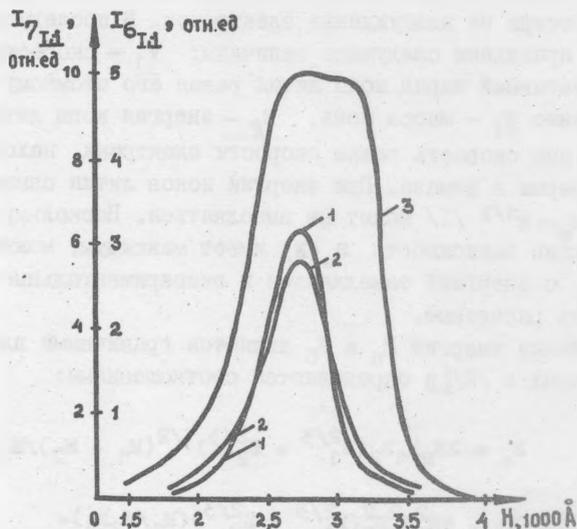
$$E_a = 2E_R z_1 z_2 (z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{1/2} (M_1 + M_2) / M_2$$

$$E_0 = 4E_R^2 z_1^2 z_2^2 (z_1^{2/3} + z_2^{2/3}) (M_1 / M_2 E_a)$$

Здесь: E_R - энергия Ридберга = 13,7 эВ; E_a - пороговая энергия смещения атома из узла решетки, для алмаза $E_a = 50$ эВ /3/; z_1, z_2 , M_1, M_2 - атомные номера и массы налетающего иона и мишени, соответственно. Как видно из табл. I, интервал энергий между E_a и E_0 значительно меньше исследуемого.

Для определения профиля распределения лития в алмазе использовался метод масс-спектропии вторичных ионов. Работа выполнена на комбинированном спектрометре СИМС-Оже фирмы Бальцерс. Давление по остаточным газам не превышало 10^{-9} тор. Распыление образца производилось пучком ионов аргона с энергией 3 кэВ при плотности тока до 50 мкА/см². Неоднородность плотности тока пучка на площади 1 мм² составляла примерно 2%. Скорость распыления образца определялась с точностью ± 100 Å по глубине ямы, оставленной на образце пучком. Таким образом при глубине профиля 1000 Å ошибка могла составлять 10%, что явилось основной погрешностью измерения. Стабильность пучка и регистрирующей аппара-

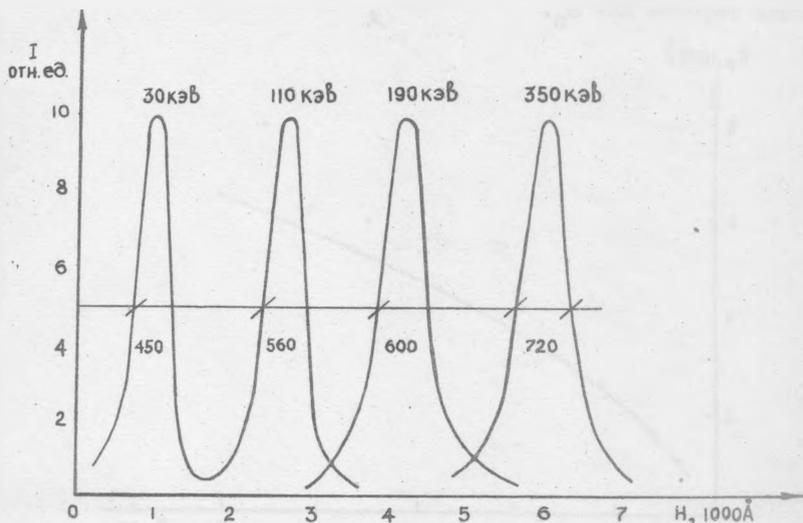
туры обеспечивала значительно большую точность. Внедрение лития в алмаз производилось при комнатной температуре. Отжигу образцы не подвергались.



Р и с. 1. Распределение изотопов Li^6 и Li^7 , внедряемых в алмаз при $E = 110$ кэВ: 1 - Li^6 - до внедрения Li^7 ; 2 - Li^6 - после внедрения Li^7 ; 3 - Li^7

Для учета роли радиационно-стимулированной диффузии имплантируемых ионов в образец алмаза был внедрен изотоп Li^6 дозой $2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} , а затем Li^7 с той же энергией, но дозой $2 \cdot 10^{16}$ см^{-2} . На рис. 1. показаны профили распределения атомов Li^6 до внедрения Li^7 (1), Li^6 после внедрения Li^7 (2) и профиль Li^7 (3). Видно, что последующая имплантация с большой дозой Li^7 изменила профиль распределения Li^6 наиболее опутимо на "хвостах" распределения. Ширина кривой распределения на полувсоте изменилась незначительно. В последующих экспериментах дозы не превышали $(2-4) \cdot 10^{15}$ см^{-2} . Поэтому при обсуждении результатов настоящей работы радиационно-стимулированной диффузией можно пренебречь.

На рис. 2 представлены профили распределения лития для различных энергий. Видно, что в пределах изменения концентрации лития в 5 раз профили имеют симметричную гауссовскую форму. Мы провели сравнение полученных в эксперименте результатов с теоре-

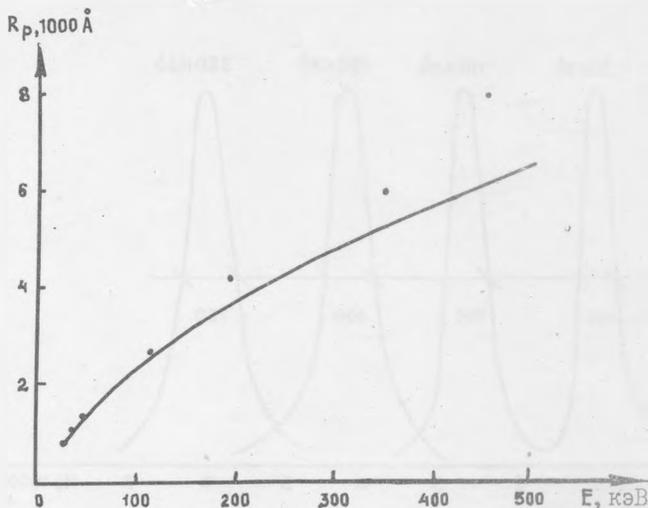


Р и с. 2. Профили распределения атомов лития, внедренных в алмаз. Цифрами обозначена ширина кривой распределения на полувысоте (в Å)

тическими расчетами, приведенными в работе /2/. Использование в /2/ дифференциального сечения Фирсова /4/ для ядерных столкновений при определении пробега в данном случае, видимо, несущественно, так как потери, главным образом, связаны с возбуждением электронов. На рис. 3 видно, что до энергии 110 кэВ точки хорошо укладываются на расчетную кривую, при дальнейшем увеличении энергии разность между экспериментальным пробегом и расчетным увеличивается. Таким образом, невыполнение условия $\epsilon < E_p$ (см. табл. I) оказывается достаточно критичным.

На рис. 2 приведены значения ширины гауссовского распределения на полувысоте, равные согласно теории $I/2,5 \Delta R_p$, где ΔR_p — среднеквадратичное отклонение величины проецированного

пробега. Экспериментальные значения в несколько раз меньше рассчитанных в работе /2/. Так как среднеквадратичное отклонение среднего пробега определяется как раз ядерными столкновениями, то расхождение с теорией связано с использованием в /2/ выражения Фирсова для S_n .



Р и с. 3. Зависимость проецированного пробега от энергии для ионов лития, внедряемых в алмаз: сплошная кривая - результаты расчета /2/, точки - результаты эксперимента

Для двух энергий 30 и 100 кэВ нами были подсчитаны среднеквадратичные отклонения по теории ЛШШ для полного пробега лития в алмазе. Ширина гауссовского распределения по расчету оказалась равной 500 и 750 Å, соответственно для 30 и 100 кэВ. Экспериментальные значения составляют 450 и 720 Å. Это является удовлетворительным совпадением.

В заключение авторы выражают благодарность профессору В. С. Вавилову за внимание к работе и В. С. Куликаускасу (ЛЯР МГУ) за внедрение лития в образцы.

Поступила в редакцию
20 января 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. J. Lindhard, M. Scharf, H. E. Schiott, *Kgl. Danske Videnskab Mat. Fys. Medd.*, 33, No. 14 (1963).
2. М. А. Кумахов, В. А. Муравлев, Е. Г. Аверьянов, В. А. Симонов, Л. П. Хавкин, Проективные пробеги и разбросы пробегов для I240 комбинаций ион-мишень в интервале энергий $20 \leq E \leq 1000$ кэВ, изд. МГУ, М., 1974 г.
3. C. D. Clark, P. J. Kemmey, W. J. Mitchell, *Disc. Faraday Soc.*, 30, 96 (1961).
4. О. Б. Фирсов, *ЖЭТФ*, 32, 1464 (1957).