

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНОВ ЛИТИЯ В КРЕМНИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К.Б. Кадыракунов, Л.Н. Кацауров, В.В. Краснопевцев,
Е.В. Нидаев, К. Нургалиев, Л.С. Смирнов

УДК 621.315.592:537.534:539.21.082.79

Установлено, что рекристаллизация кремния с имплантированным литием под действием импульсного лазерного излучения приводит к отгеснению примеси к поверхности.

Литий в кремнии характеризуется высокой растворимостью и большим коэффициентом диффузии ($\sim 10^{-5}$ см²/с при 1100 °С). Атомы лития в междоузлиях решетки играют роль мелких доноров и способны перемещаться в электрических полях при температурах, близких к комнатной. Вместе с тем, до сих пор отсутствуют надежные данные о влиянии на кремний, легированный литием, экстремальных условий, в частности, воздействия мощных импульсов лазерного излучения, которое сопровождается сильным разогревом кристалла, интенсивной генерацией электронно-дырочных пар, возникновением значительных электрических полей и механических напряжений. Интересны также слои кремния, содержащие литий при концентрациях, превышающих равновесную растворимость примеси.

В настоящей работе приведены данные о пространственном перераспределении имплантированных атомов лития в кремнии под действием импульсного лазерного излучения, полученные с помощью резонансной ядерной реакции ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}^*$. Обычные методы исследования, такие как электрические измерения и обратное рассеяние ионов в этом случае оказываются малоэффективными, поскольку не все атомы Li в кремнии являются электрически активными, а их масса меньше массы атомов Si.

В основе метода исследования лежит явление резонансного захвата протона ядром ${}^7\text{Li}$, вследствие чего оно превращается в составное возбужденное ядро ${}^8\text{Be}^*$. После испускания гамма-квантов с энергией 14,4 и 17,2 МэВ ядро Be распадается на две альфа-частицы. Максимальный выход гамма-излучения

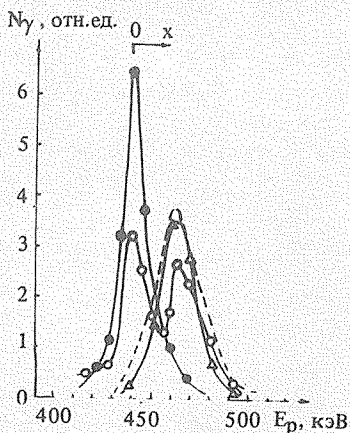
при резонансной реакции ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}^*$ приходится на энергию протонов $441,0 \pm 0,3$ кэВ, а естественная ширина кривой резонансной реакции составляет $12,2 \pm 0,5$ кэВ /1/.

Экспериментальная установка для исследования выхода гамма-излучения с электростатическим генератором типа ЭГ-2 описана в /2/. Абсолютное разрешение по энергии ΔE_0 составляет ± 1 кэВ, что соответствует относительному разрешению при энергии протонов E_0 около 400 кэВ $\Delta E_0/E_0 = 2,5 \times 10^{-3}$. Статистическая ошибка при измерении относительного выхода реакции не превышала 3%. Чувствительность установки по концентрации достигала около 10^{19} см $^{-3}$ при разрешении по энергии (глубине) не хуже 2 кэВ (10 нм).

Используемые плоскопараллельные пластины вырезались из кремния p-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Энергия ионов ${}^7\text{Li}$ составляла 85 кэВ, доза 10^{16} см $^{-2}$, средний проецированный пробег $R_p \approx 460$ нм; средняя концентрация Li в слое $\sim 2 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$. Для отжига использовалось излучение рубинового лазера ГОР-300; длина волны излучения 693 нм, длительность импульса 30 нс, плотность энергии в импульсе $E = 0,8, 1,5$ и $1,8$ Дж/см 2 . Необходимая однородность падающего излучения по сечению достигалась путем рассеяния луча на матовой поверхности. Расположенный за матовым стеклом зеркальный канал позволял снизить потери излучения за счет рассеяния.

На рис. 1 представлены профили распределения концентрации имплантированных атомов лития в кремнии после воздействия импульсов излучения с различной плотностью энергии. Если при плотности $E = 0,8$ Дж/см 2 профиль после отжига практически не меняется, то при $E = 1,5$ Дж/см 2 возникает дополнительный максимум у поверхности, а величина максимума вблизи R_p уменьшается. Увеличение энергии до $1,8$ Дж/см 2 приводит к полному исчезновению исходного максимума и дальнейшему увеличению максимума, соответствующего имплантированному литию на поверхности подложки.

Сопоставляя полученные результаты с известными данными о перераспределении примеси под действием наносекундных лазерных импульсов /3/, можно сказать, что наблюдаемое изменение профилей распределения лития обусловлено, видимо, частичным (в случае $E = 1,5$ Дж/см 2) или полным ($E = 1,8$ Дж/см 2) плавлением приповерхностного слоя и оттеснением лития к поверхности движущимся фронтом кристаллизации. Полуширина последней кривой выхода гамма-квантов сравнима с полушириной резонанса, что указывает на очень тонкий слой, в котором сосредоточен Li. По-видимому, литий выпадает на поверхности (или вблизи поверхности) в виде металлической фазы или Si_nLi_4n . В пользу этого свидетельствуют следующие данные.



Р и с. 1. Зависимость относительного выхода гамма-квантов от энергии падающих протонов для кремния с имплантированными ионами лития до и после импульсного лазерного отжига при плотности энергии 0,8 (Δ), 1,5 (\circ), 1,8 (\bullet) Дж/см²; пунктиром показана кривая, соответствующая расчетному профилю распределения внедренного Li. Точке 0 на оси OX соответствует поверхность образца.

Во-первых, наблюдаемое перераспределение лития происходит при тех же плотностях падающей энергии, что и импульсный лазерный отжиг ионно-имплантированных слоев [4]. Во-вторых, миграция лития происходит не в обе стороны, что должно наблюдаться при обыкновенном механизме диффузии, а направлена к поверхности. Еще одним подтверждением этого обстоятельства является тот факт, что общее количество лития после перераспределения (площадь под кривой) остается практически неизменным.

Оттеснение атомов лития к поверхности говорит о малом коэффициенте распределения лития в кремнии. В самом деле, в обычных условиях в точке плавления он составляет $\sim 10^{-2}$ [5]. Таким же коэффициентом распределения обладают атомы Sb и Ga [3]. Однако, в отличие от сурьмы, коэффициент распределения лития остается много меньше единицы и в случае сверхкратких воздействий. Такими же свойствами обладают и атомы галлия [6].

Таким образом, воздействие наносекундных импульсов лазерного излучения большой мощности на кремний с имплантированным литием приводит к переплавлению легированного слоя и оттеснению примеси к поверхности.

Авторы благодарны В.А. Дравину за внедрение лития на ускорителе фирмы NVE Inc. Егоре и В.В. Тишину за помощь в работе на ускорителе ЭГ-2.

Поступила в редакцию 11 июля 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marion J.V. Rev. Mod. Phys., 33, 139 (1961).
2. Затолокин Б.В. и др. Физические основы ионно-лучевого легирования. Материалы научной конференции, Горький, 1972, часть I, с. 47-50.
3. White C.W. et al. J. Appl. Phys., 51, 738 (1980).
4. Wang J.C., Wood R.F., Pronko P.P. Appl. Phys. Lett., 33, 455 (1978).
5. Pell E.M. J. Phys. Chem. Solids, 3, 7 (1957).
6. Wood R.F., Kirkpatrick J.R., Giles G.E. Phys. Rev. B, 23, 5555 (1981).