

05;10;12

Резонанс в эффективности формирования проводящего состояния кристаллического кварца ионной бомбардировкой

© В.Ф. Пичугин, Т.С. Франгульян

Томский политехнический университет

E-mail: pichugin@oasis.cctpu.edu.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2000 г.

При ионном облучении кристаллического кварца обнаружен резонанс в зависимости электропроводности от величины массового числа бомбардирующих ионов. Резонанс имеет место при оптимальном соотношении потерь энергии на ядерное и электронное торможение взаимодействующих с кристаллическим кварцем ионов в области значений их массового числа 35–45 а.

Одним из наиболее ярких эффектов воздействия ионного облучения на диэлектрические материалы, в частности на кварц, является гигантское увеличение их электрической проводимости [1,2]. В результате ионной обработки электропроводность кварца изменяется от значения $10^{-17} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ до $10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, т.е. в 10^{20} раз. Практическое использование этого эффекта требует знания способов управления его свойствами. Предметом настоящей работы является проблема эффективности ионных пучков различных химических элементов при формировании проводящего состояния кварца.

Образцы для исследований представляли собой полированные пластины АТ-среза кварца толщиной 0.1 mm. Облучение производилось потоками ионов ряда элементов: H^+ , He^+ , C^+ , O^+ , Al^+ , Si^+ , Ar^+ , Cu^+ , Cd^+ , Pb^+ , с использованием как стационарных, так и частотно-импульсных пучков. Как видно, свойства имплантированных ионов весьма разнообразны. Энергия бомбардирующих ионов изменялась в интервале (20–100) keV, доза облучения составляла 10^{16} ион/см². Микроскопические исследования поверхности образцов после облучения показали отсутствие каких-либо изменений ее рельефа. Особая роль постимплантационной термической обработки кварца хорошо известна [2], поэтому все образцы после ионного облучения нагревались в

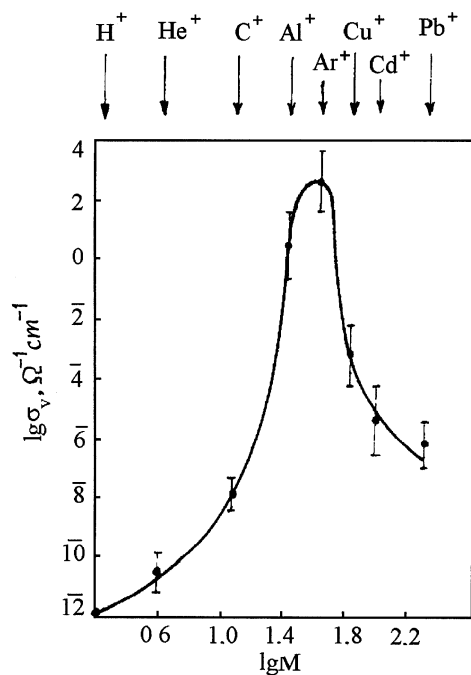


Рис. 1. Зависимость величины объемной проводимости σ_v кристаллического кварца от величины массового числа M имплантируемых ионов. Доза облучения $D = 1 \cdot 10^{16} \text{ ion/cm}^2$, энергия бомбардирующих ионов $E = 100 \text{ keV}$.

вакууме до температуры 600 К с целью стабилизации эффекта повышения проводимости, после чего производилось измерение электропроводности при комнатной температуре.

В исходном состоянии электрическая проводимость кварца имеет ионный характер [3]. Облучение образцов кварца различными ионами приводит качественно к одному эффекту — повышению электрической проводимости в 10^5 – 10^{20} раз в зависимости от величины массового числа бомбардирующих ионов (рис. 1). Рост проводимости сопровождается снижением энергии активации электропереноса от 1.5 eV, характерной для необлученных образцов до величины порядка 0.03 eV после ионной бомбардировки.

Для того чтобы сопоставить эффекты воздействия потоков ионов различной массы и энергии, производился расчет величины объемной проводимости σ_v ионно-модифицированных слоев. При расчетах использовались значения проективных пробегов бомбардирующих ионов, рассчитанные с помощью программы TRIM [4]. Проведенные исследования [2] показывают, что наведенное ионным облучением проводящее состояние кварца определяется не столько химической природой имплантируемых ионов, сколько теми фундаментальными структурными перестройками решетки, которые происходят в результате ионной бомбардировки, так что механизм электропереноса в ионно-модифицированных слоях можно назвать универсальным в том смысле, что он не зависит от природы имплантированных ионов.

Проводимость ионно-имплантированных слоев зависит от величины атомной массы имплантируемого элемента. На рис. 1 представлена зависимость величины объемной проводимости (σ_v) слоев кварца, подвергнутых ионной бомбардировке от величины массового числа (M) бомбардирующих ионов $\sigma = f(D)$. Из данных рисунка видно, что величина σ_v резко, более чем на 14 порядков, возрастает с ростом массового числа M имплантируемых ионов в интервале значений от 1 до 40 у. Дальнейшее увеличение массы бомбардирующих ионов в интервале от 40 до 207 у приводит к резкому уменьшению σ_v ионно-облученного слоя. Наблюдаемая зависимость $\sigma = f(D)$ свидетельствует о том, что имеет место резонанс в эффективности формирования проводящего состояния кристаллического кварца ионным облучением в зависимости от величины массового числа бомбардирующих ионов M с максимумом при $M = 40$ у. Очевидно, что эта зависимость определяется особенностями протекания процессов структурно-химической перестройки поверхности при взаимодействии с ней частиц с различными массами. Для объяснения наличия экстремума на зависимости $\lg \sigma_v = f(M)$ были привлечены процессы взаимодействия налетающих ионов с кристаллом. При взаимодействии высокоэнергетических ионов с твердым телом диссипация энергии идет преимущественно по двум каналам. Часть энергии расходуется в упругих столкновениях с ядрами мишени, что приводит к смещению атомов мишени из регулярных узлов кристаллической решетки, а другая — на неупругие взаимодействия с электронной подсистемой. Нами были выполнены расчеты, позволившие оценить соотношение между этими видами потерь. Расчет ядерной и

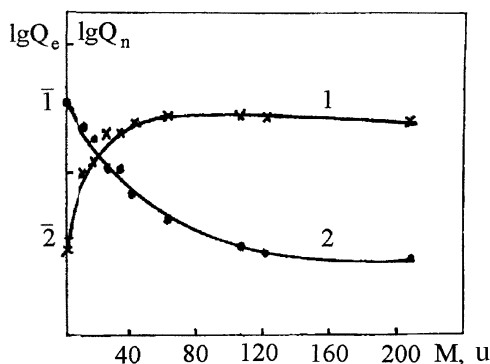


Рис. 2. Зависимость потерь энергии на ядерное Q_n (кривая 1) и электронное Q_e (кривая 2) торможение от величины массового числа бомбардирующих ионов. Энергия ионов $E = 100$ keV. Материал мишени — SiO_2 .

электронной тормозных способностей $S_n(E)$ и $S_e(E)$ производился в соответствии с теорией Линхарда. Потенциал взаимодействия $V(r)$ представлял собой обычный кулоновский потенциал, функция экранирования использовалась в виде, принятом в работе [5]. Вычисление потерь энергии на ядерное Q_n и электронное Q_e торможение производилось согласно алгоритму, изложенному в работе [6] и основывалось на модели, предполагающей однородность и изотропность мишени, отсутствие эффекта каналирования, независимость ядерного и электронного торможения. Расчет потерь энергии проводился в одночастичном приближении.

Результаты численных расчетов представлены на рис. 2. Видно, что с увеличением массового числа бомбардирующих ионов растет доля энергии, затрачиваемой на ядерное торможение и уменьшается доля энергии, теряемой в электронных процессах. Равенство потерь на ядерное и электронное торможение имеет место в области значений массового числа M бомбардирующих ионов (30–40) u. Процессы ядерного торможения, сопровождаемые созданием смещений несут основную ответственность за нарушение дальнего порядка и аморфизацию поверхности. Кварц относится к материалам с преимущественно ковалентным типом связи и аморфизуется уже при дозах порядка 10^{15} ion/cm².

Реализованные в работе условия эксперимента позволяют считать, что модифицированные ионным облучением слои кварца находятся в аморфном состоянии, которое отличается от кристаллического тем, что в формировании его дефектной структуры под действием ионных пучков важную роль начинают играть электронные возбуждения, способные создавать дефекты с помощью менее энергоемкого подпорогового механизма [7–9]. Электронные возбуждения создают дефекты типа разорванных связей, в результате чего образуются слабо связанные не-мостиковые атомы кислорода, что повышает вероятность их десорбции с поверхности в результате возбуждения связи. Электронные процессы являются основным процессом предпочтительного удаления атомов кислорода с поверхности кварца [10–12]. Поверхность обогащается избытком кремния, который участвует в формировании системы локализованных состояний за счет переключения связей.

С увеличением массы M налетающих ионов растет доля упругорассеянной энергии (рис. 2, кривая 1), что способствует переходу поверхности в аморфное состояние в результате роста числа смещенных ионов. Однако это является необходимым, но недостаточным условием для формирования системы энергетических состояний, определяющих процесс электропереноса. В формировании последних особую роль, очевидно, играют процессы электронного возбуждения, эффективность которых уменьшается с увеличением массового числа M бомбардирующих ионов (рис. 2, кривая 2). Суперпозиция этих процессов, оптимальное соотношение которых имеет место при $M = 40$ у, обеспечивает существование резонанса в зависимости величины ионно-индуцированной проводимости от значения массового числа бомбардирующих ионов.

Список литературы

- [1] *Pichugin V.F., Feodorov A.N., Shmyrin A.I.* // Phys. Res. 1989. V. 13. P. 337–339.
- [2] *Пичугин В.Ф., Франгульян Т.С., Тишкина В.А.* и др. Деп. ВИНТИ № 08-66/878, 26.07.1993.
- [3] *Lazzari S., Martini M.* et al. // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. 1988. B. 32. P. 299–302.
- [4] *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark K.* // Stopping and ranges of ions in Matter Pergamon Press. New York. 1985.
- [5] *Линхард Й.* // УФН. 1969. Т. 99. С. 249–296.
- [6] *Кривобоков В.П., Пащенко О.В.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 3. С. 188–191.

- [7] *Fischer H., Gotz G., Karge H.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1983. V. 76. P. 493–499.
- [8] *Яркулов У.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 1. С. 2222–2226.
- [9] *Cotter J.J., Bergeron C., Lowe L.F.* // Mat. Res. Bull. 1973. V. 8. P. 505–514.
- [10] *Максаулай-Ньюкомбер R.G., Томпсон D.A.* et al. // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. 1990. В46. P. 180–184.
- [11] *Пранявичус Л.Й., Тамулевичус С.Й., Матюкас А.П.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 24. С. 1512–1515.
- [12] *Павлов П.В.* // ДАН СССР. 1981. Т. 258. № 3. С. 617–619.